

王叶红, 赵玉春. 2020. 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, 44(5): 935–959. WANG Yehong, ZHAO Yuchun. 2020. Numerical Investigation of the Effects of Boundary Layer Parameterization Schemes on Typhoon Meranti (1614) Landing Process [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 935–959. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19135

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

王叶红^{1,2,3} 赵玉春^{1,3}

1 厦门市气象局海峡气象开放实验室, 厦门 361012

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG), 北京 100029

3 福建省灾害天气重点实验室, 福州 350001

摘 要 利用中尺度数值模式 WRF v3.8 中的 YSU、MYJ、QNSE、ACM2、UW、GBM、Boulac 七种不同边界层参数化方案, 采用高分辨率(1.33 km)数值试验的方法研究了不同边界层方案对模拟台风“莫兰蒂”(1614)登陆减弱阶段的移动路径、强度、结构、降水量、近地层有关物理量场分布等方面的影响, 结果表明: (1) “莫兰蒂”台风登陆减弱阶段, 不同边界层方案对台风路径、强度、降水量模拟影响显著, 24 h 内模拟台风路径、最低气压、最大风速及 24 h 累积降水量极值的最大差异分别达 80 km、11 hPa、27 m s⁻¹ 及 241 mm; (2) Boulac 方案模拟台风路径与实况最为接近, GBM、YSU 和 MYJ 方案分别次之, ACM2 和 UW 方案再次之, 而 QNSE 方案最差; UW 和 QNSE 方案模拟的最低气压以及 MYJ 和 QNSE 方案模拟的最大风速与观测最为接近; 不同边界层方案均模拟出台风登陆阶段最低气压逐渐升高以及其升高速率在台风登陆后大于登陆前的特征, 这与实况一致, 但台风登陆前各方案模拟最低气压升高速度均大于实况, 而台风登陆后却又不及实况; (3) Boulac 方案模拟的 24 h 降水分布、强降水落区、结构、强度和各级降水 TS 评分均最优, MYJ 方案次之; 而 QNSE、UW 和 ACM2 方案雨带向西北方向推进过快, 各级降水 TS 评分均较差; (4) 综合台风路径、强度和降水模拟, Boulac 和 MYJ 方案相对最优, 其中 Boulac 方案在台风路径和降水模拟上更优, 而 MYJ 方案在台风强度模拟上更优; YSU 和 GBM 方案次之, 而 QNSE、UW 和 ACM2 方案相对较差; (5) 不同边界层方案计算的近地层潜热通量、感热通量显著不同, 进而影响台风路径、强度、降水量模拟存在显著差异。比较而言, QNSE 方案潜热通量相对异常偏高, MYJ 和 Boulac 方案量值适中, 其余方案相对偏低; QNSE 方案感热通量相对略偏高, MYJ 方案适中, 其他方案则相对显著偏低; (6) 不同边界层方案模拟降水区边界层热、动力结构显著不同, 其中 Boulac 方案具有较明显优势, 尤其是对日间边界层结构的模拟。

关键词 台风 边界层参数化方案 数值模拟 热通量

文章编号 1006-9895(2020)05-0935-25

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19135

Numerical Investigation of the Effects of Boundary Layer Parameterization Schemes on Typhoon Meranti (1614) Landing Process

WANG Yehong^{1,2,3} and ZHAO Yuchun^{1,3}

1 Laboratory of Straits Meteorology, Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012

收稿日期 2019-03-26; 网络预出版日期 2020-05-09

作者简介 王叶红, 女, 1974 年出生, 正研级高工, 主要从事资料同化和中尺度数值模拟研究。E-mail: 278403168@qq.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41675047、41405106, 厦门市科技惠民计划项目 3502Z20174052, 公益性行业(气象)科研专项 201506007, 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室开放课题

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41675047, 41405106), People-Benefited Scientific and Technological Program of Xiamen City (Grant 3502Z20174052), Nonprofit Industry (Meteorology) Research Subject (Grant 201506007), Open Research Programme of State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001

Abstract To study the effects of different boundary layer schemes on the simulation of landing attenuation stage of typhoon Meranti (1614), a series of high-resolution (1.33 km) numerical tests were carried out using seven boundary layer parameterization schemes in the mesoscale numerical model WRF v3.8, namely, YSU, MYJ, QNSE, ACM2, UW, GBM, and Boulac, in terms of movement track, intensity, structure, rainfall, and near-surface physical variables. The results indicate the following. First, boundary layer schemes significantly influenced the simulation of typhoon Meranti's track, intensity, and rainfall during its landing attenuation stage, and the maximum differences in the 24-h simulated typhoon track, lowest atmospheric pressure, maximum wind velocity, and 24-h cumulative rainfall extremum were 80 km, 11 hPa, 27 m s^{-1} , and 241 mm, respectively. Second, simulation results of the Boulac scheme showed a typhoon track that is closest to real-time results, followed by GBM, YSU, and MYJ schemes, and then by ACM2 and UW schemes, whereas the QNSE scheme displayed the worst simulation. Meanwhile, the UW and QNSE schemes simulated the lowest atmospheric pressure values, and MYJ and QNSE schemes simulated the maximum wind velocity values that are closest to actual observations. All boundary layer schemes simulated the features of the typhoon. For example, the lowest atmospheric pressure increased gradually during the landing stage, and the rate of such increase after landing was greater than that before landing, which agreed with real-time results. However, the increasing rate of the lowest atmospheric pressure before the typhoon landing that was simulated by each scheme is greater than the real-time result, whereas such increasing rate after typhoon landing is less than the real-time result. Third, the Boulac scheme best simulated the 24-h precipitation distribution, heavy precipitation area, structure, intensity, and TS score of precipitation at each level, whereas the MYJ scheme was the second best. As simulated by QNSE, UW, and ACM2 schemes, the rain belt advanced so quickly northwestward that the TS scores of precipitation at various levels were poor. Fourth, in the overall simulation of track, intensity, and precipitation of the typhoon, Boulac and MYJ schemes showed optimal results, in which the Boulac scheme was superior in simulating the typhoon track and precipitation and the MYJ scheme was superior in simulating typhoon intensity. The YSU and GBM schemes had the second best simulation results, whereas QNSE, UW, and ACM2 schemes had worse simulation performance. Moreover, the boundary layer schemes significantly differed in calculating the latent heat flux and sensible heat flux of near-surface layer, thereby affecting the simulation of typhoon track, intensity, and rainfall, leading to significantly different simulation results. The QNSE scheme resulted in an abnormally high latent heat flux, the MYJ and Boulac schemes resulted in the most modest values, and other schemes resulted in slightly smaller values. On the other hand, the QNSE scheme had a slightly higher sensible heat flux, the MYJ scheme showed the most modest one, and other schemes resulted in significantly smaller values. Finally, the boundary layer schemes significantly differed in the simulated thermal and dynamical structure of boundary layer, and Boulac scheme had the obvious advantages, particularly for the structure of boundary layer in daytime.

Keywords Typhoon, Boundary layer parameterization schemes, Numerical simulation, Heat flux

1 引言

台风具有突发性强、破坏力大等特点,是我国最严重的自然灾害之一,常常给国民经济和人民生命财产带来严重损失(赵玉春和王叶红, 2019)。对台风路径、强度及其伴随的强风暴雨的准确及时的预报是预防和减轻灾害的关键,也一直是我国天气预报的重点和难点。目前,数值预报是预报台风的最有效手段。然而,受物理过程认知和模式分辨率的限制,大气中许多重要的物理过程一般通过参

数化的方法被引入模式(崔驰潇等, 2018; 庞琦烨等, 2019)。

边界层过程是模式中最重要物理过程之一。Stull (1988) 将大气边界层定义为直接受下垫面影响的那部分大气,主要响应地表的摩擦阻力、蒸发、蒸腾、热量输送、污染物排放以及影响气流变化的地形等作用,并通过边界层内部的湍流交换进行地气间动量、热量和水汽等物质能量的交换,直接影响天气系统的发生发展。由于大气边界层湍流运动一般远比现有的中小尺度模式水平格距小,需要考

虑次网格尺度效应 (Bryan et al., 2003), 因此, 当前数值模式一般通过参数化来描述次网格边界层湍流对可分辨大气运动的影响。目前, 根据原理不同有多种边界层参数化方案 (Mellor and Yamada, 1982; Bougeault and Lacarrere, 1989; Hong and Pan, 1996; Janjić, 2001; Hong et al., 2006), 各有特点 (孙文奇和李昌义, 2018)。研究表明, 不同边界层参数化方案对地表风场、温度场 (Zhang and Zhang, 2004; 王颖等, 2010)、湿度场、降水量场 (陈炯和王建捷, 2006; 陈杨瑞雪和罗亚丽, 2016)、边界层结构 (徐慧燕等, 2013) 的模拟存在较大差异, 并且不同区域、不同影响系统对边界层参数化方案敏感程度的差异也有所区别。

边界层参数化在台风数值模拟中有重要作用。邓国等 (2005) 研究表明台风边界层通过摩擦混合和辐射等作用与地表产生水汽、热量和动量的交换, 并通过湍流效应和积云的夹卷作用将边界层的影响扩展至整个自由大气。是否考虑边界层参数化对台风路径和强度的模拟影响显著 (邓国等, 2005; 江丽芳等, 2017), 而且不同边界层参数化方案对台风结构、强度变化、路径模拟等也有重大影响 (Davis and Bosart, 2002; 邓国等, 2005; Li and Pu, 2008; Hill and Lackmann, 2009; 王雨星等, 2017; 徐亚钦等, 2017), 且这种差异不限于边界层 (江丽芳等, 2017)。Nolan et al. (2009a, 2009b) 详细评估了 YSU 和 MYJ 两种边界层参数化方案对飓风 Isalel (2003) 最大风速、飓风外围与内核区的边界层结构以及飓风的眼墙结构影响的差异, 发现两种方案都表现出了台风边界层结构的特征。王晨稀 (2013) 利用 GRAPES-TCM 模式对“梅花”台风 (2011) 进行 MRF 和 YSU 两种边界层参数化敏感试验, 发现 YSU 方案能够产生更多的地表潜热通量, 这将导致更多的潜热释放和降水产生, 形成一个正反馈。孙敏 (2012) 研究发现边界层参数化方案主要通过近地面边界层摩擦和潜热通量影响模拟结果, 不同的边界层参数化方案对台风轴对称结构存在一定的影响。温晓培等 (2016) 研究了 YSU、MYJ、QNSE、ACM2 和 Boulac 五种不同边界层参数化方案对台风 Sanba (2012) 初生阶段的移动路径、强度及物理量场分布等方面的影响, 结果表明 QNSE 和 ACM2 方案对 Sanba 台风发展初期边界层过程的处理较完善, 能够较好地处理边界层过程和边界层热带扰动的形成和发展; 而 MYJ

方案对此次台风的模拟效果最差。徐亚钦等 (2017) 选取了多种微物理和边界层方案对影响浙江的 9 个台风进行模拟, 发现 MYNN2 和 Boulac 边界层方案模拟的台风路径和强度接近实况的比例最高, Boulac 方案对降水的模拟更好, 因此 Boulac 方案更适合浙江台风的预报模拟。丁成慧等 (2018) 比较了两个局地 (QNSE、MYJ) 闭合和两个非局地 (YSU、ACM2) 闭合的边界层参数化方案对台风“莎莉嘉” (2013) 的敏感性试验, 结果表明, 不同边界层参数化方案对台风路径影响较小, 但对台风强度和结构有明显的影响, 且非局地闭合边界层方案明显优于局地闭合边界层方案。还有一些研究表明, 边界层方案在台风中后期影响其发展强度, 是影响台风发展的重要物理机制之一 (邓国等, 2005; 张建海等, 2007; 赖文峰等, 2010; 周昊等, 2013)。王雨星等 (2017) 研究了超强台风 Megi (2010) 路径模拟对 YSU 和 MYJ 两种边界层参数化方案的敏感性, 并从模拟台风尺度差异所造成的影响角度揭示了边界层参数化方案影响台风路径的机理, 认为不同方案对边界层垂直混合作用过程的描述不同, 导致低层水汽垂直输送、外围螺旋雨带和台风尺度存在差异, 进而导致副热带高压存在差异, 从而导致由副热带高压主导的引导气流发生改变, 最终使得采用 YSU 方案模拟的 Megi (2010) 路径出现提前转向。

以往研究表明不同边界层参数化方案对台风模拟有重要影响, 且其影响对不同台风并不完全一致, 因此针对更多台风开展数值试验来扩展和加深边界层参数化方案对台风模拟影响的认识至关重要。此外, 以往针对台风登陆阶段开展边界层参数化方案影响研究相对较少, 事实上, 边界层参数化方案对台风登陆阶段数值模拟的影响更为明显与复杂, 因为此时台风主体所处下垫面由单一海洋逐渐向海—陆交界处转换, 因此边界层过程影响较台风初生阶段和成熟阶段更为复杂, 与此同时, 登陆阶段台风路径、强度和风雨的准确预报对防灾减灾救灾的意义也更为重要。因此开展登陆阶段不同边界层参数化方案的影响研究具有重要意义, 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。2016 年超强台风“莫兰蒂” (1614) 登陆厦门, 造成严重灾害损失 (赵玉春等, 2018; 王叶红等, 2019)。本文利用 WRF v3.8 模式对 2016 年 9 月 14 日“莫兰蒂”台风登陆过程进行高分辨率 (1.33 km) 数

值模拟, 采用七种边界层参数化方案进行敏感性数值试验, 研究台风“莫兰蒂”登陆阶段不同边界层参数化方案对台风路径、强度、降水量及感潜热通量、边界层结构等方面的影响。

本文使用的资料包括中国气象局业务下发台风实况资料、全国常规地面雨量站及福建省地面加密自动站观测的降水资料、以及美国国家大气研究中心/美国国家环境预报中心 (NCAR/NCEP) 提供的 0.5° (经度) $\times 0.5^\circ$ (纬度) 的 CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) 再分析资料和 GFS (Global Forecast System) 分析资料。数值试验中以模拟台风区域内最小海平面气压 (sea level pressure, 简称 SLP) 所在位置表征台风中心位置。

2 “莫兰蒂”台风暴雨过程及业务模式预报概况

2.1 台风暴雨过程

1614 号台风“莫兰蒂”是 2016 年发生在西北太平洋的一个超强台风, 具有强度大、移速多变、范围广和影响持续时间长等特点。该台风初始阶段的热带低压形成于 9 月 10 日, 9 月 12 日加强为超强台风。9 月 14 日 20:00 (北京时, 下同), 500 hPa

等压面上副热带高压位于西北太平洋上空, 其脊线位于 30°N 附近, 588 dagpm 特征等高线西伸脊点位于 118°E 附近, “莫兰蒂”台风位于副热带高压西侧, 其中心位于台湾海峡, 在副热带高压西南侧东南气流引导下向西北方向移动。100 hPa 等压面上, 南亚高压呈准东西向带状分布, 其脊线位于 28°N 附近, 1672 dagpm 等值线位于 110°E 附近, 台风位于南亚高压与副热带高压之间。700 hPa 和 850 hPa 等压面上, 台风东南侧存在一支较强的东南季风气流汇入台风环流, 西南季风气流弱。台风东南侧 (15°N , 131°E) 附近有一热带风暴发展 (图 1a)。

在上述系统的影响下, 2016 年 9 月 14 日 08:00 至 15 日 08:00, 闽浙沿海至江苏北部出现特大暴雨天气, 强降水主要位于福建省厦门、泉州、莆田、福州至宁德一带 (图 1b), 加密自动站观测到的 24 h 累积降雨量最大达 289 mm, 出现在福州市连江县江南乡梅洋村 (26.15°N , 119.46°E)。福建东南沿海存在三个 24 h 降雨量达 100 mm 以上的强降水中心, 自南向北分别位于厦门至泉州一带、福州至宁德一带及柘荣一带。逐时降水演变表明厦门至泉州一带的强降水主要由台风内核雨带造成,

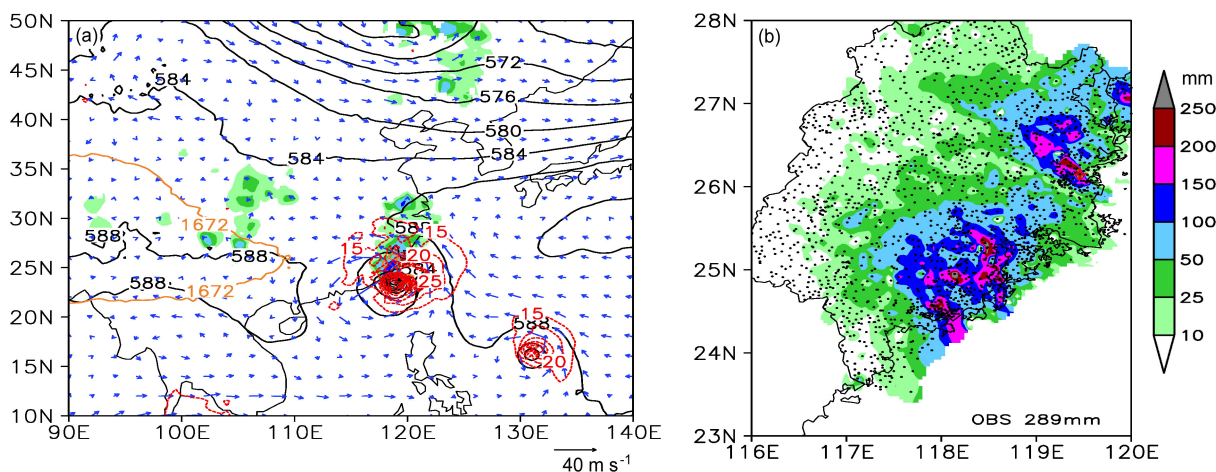


图 1 2016 年 (a) 9 月 14 日 20:00 (北京时, 下同) 天气尺度系统与物理量的综合示意图及 (b) 9 月 15 日 08:00 24 h 福建加密自动站观测的降水量分布。(a) 中黑色实线为 500 hPa 位势高度, 单位: dagpm; 橙色实线为 100 hPa 1672 dagpm 等值线; 红色虚线为 850 hPa $|V| \geq 15 \text{ m s}^{-1}$ 全风速; 风矢量代表 700 hPa 风场。(a、b) 中阴影区为 14 日 08:00 至 15 日 08:00 实况降水量。(b) 中黑色圆点为福建加密自动站分布, 红色+字为最大降水量位置。

Fig. 1 (a) Synoptic scale systems and overlaid physical variables at 2000 BT (Beijing time) 14 September and (b) 24-h rainfall (units: mm) in Fujian observed at 0800 BT 15 September, 2016. In (a), the black solid line denotes the geopotential height (units: dagpm) at 500 hPa, the orange solid line for the geopotential height of 1672 dagpm at 100 hPa, the red dashed line for $|V| \geq 15 \text{ m s}^{-1}$ at 850 hPa, the barbed arrow for the wind at 700 hPa. The shadings in (a, b) show the 24-h rainfall observed at 0800 BT 15 September, 2016. The black dots in (b) show the automatic weather station in Fujian Province. The red cross in (b) denotes the location of maximum precipitation

另外两处强降水则主要由台风强螺旋雨带造成(图略)。

15日03:05“莫兰蒂”以15级强台风在福建厦门登陆,登陆后降水强度大,15日05:00观测到最大雨强达 153 mm h^{-1} ,出现在泉州晋江龙湖镇。台风特大暴雨给厦门、泉州、莆田、福州及宁德等地带来严重的洪涝灾害。“莫兰蒂”台风登陆后强度快速减弱,其影响一直持续到17日。据民政部门统计,“莫兰蒂”台风造成闽浙两省直接经济损失达210余亿元,其中重灾区厦门直接经济损失高达102亿元。

2.2 业务模式预报概况

“莫兰蒂”台风开始编号后,尽管欧洲中期数值天气预报中心(European Centre for medium-range weather forecasts, 简称EC)细网格模式在10日20:00的预报就精确预报出了“莫兰蒂”路径和登陆点,但之后每隔12h起报的6个时次的预报路径和登陆点分别向北和向南进行了较大幅度调整,然后逐渐趋于稳定,但预报登陆点较实况均明显偏南,直至14日08:00的预报才再次逐渐接近实况(图略)。EC细网格模式预报“莫兰蒂”台风路径24h、48h、72h时效的误差分别为54.1 km、114.8 km、253.2 km,除72h时效误差略高于南海台风模式的218.3 km外,在南海台风模式、上海GRAPES_TCM模式、GRAPES_TYM、北京台风模式、东京模式中最佳(图略)。

与EC细网格模式在临近的14日08:00对“莫兰蒂”台风路径和登陆点的预报效果明显好于之前的预报不同,该时次预报风力严重偏小:预报过程最大风力偏弱4级,过程极大风偏弱3级,不及12日20:00预报的台风过程最大风力偏弱2级、过程极大风与实况量级一致数值偏小的预报结果。其他模式预报大风的情况与EC细网格模式类似(图略)。

台风暴雨落区预报依赖于台风路径预报,EC细网格模式多个时次预报台风路径和登陆点持续偏南,因而预报台风主体降水也明显偏南,至14日08:00预报台风路径和登陆点北抬,预报台风主体降水落区也北抬,与实况较为接近,但强度偏弱。相对于台风主体降水,台风外围雨带的强度和落区预报难度更大,EC细网格模式各时次预报结果均偏弱甚至漏报。中尺度区域模式,如华东模式也是如此,虽较好地预报出台风主体降水的落区和强度,

但对台风外围降水的预报明显偏弱(图略)。

以上分析可见,以EC细网格模式为例,台风登陆前可供预报员参考的最近时次14日08:00的预报,台风路径和登陆点与实况较为接近;降水落区也与实况接近,但强度明显偏弱,尤其是台风外围降水;风力预报则偏小4级左右。

3 模式简介与数值试验设计

采用中尺度数值模式WRF v3.8非静力方案进行三重双向嵌套网格模拟(图2),试验中心位于(25°N , 118.5°E),水平分辨率分别为12、4、1.33 km,水平方向格点数分别为 433×433 、 436×436 、 703×703 ,垂直方向共38个 σ 层,模式层顶50 hPa。模式物理过程采用Thompson云微物理方案(Thompson et al., 2008)、Grell-Freitas积云对流参数化方案(Grell and Freitas, 2014; 其中D02、D03区不采用积云对流参数化方案)、5层热量扩散(Thermal diffusion)陆面方案、RRTMG长波和短波辐射方案(Iacono et al., 2008)。模拟从2016年9月14日08:00开始连续积分24 h,使用美国NCAR/NCEP提供的CFSR 0.5° (经度) $\times$ 0.5° (纬度)再分析资料作为模拟的初始场和最外层网格的侧边界条件。初始化过程未采用热带气旋方案(Bogus方案)。积分时间步长为36 s。考虑到模式的spin-up时间,本文对6~24 h第三重区域模拟结果进行分析。

分别采用YSU、MYJ、QNSE、ACM2、UW、GBM、Boulac七个边界层参数化方案对“莫兰蒂”台风登陆阶段的风雨过程进行数值试验(表1),

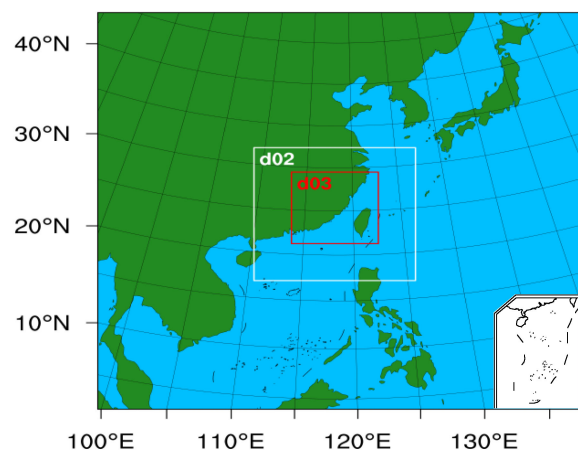


图2 模拟区域设置

Fig. 2 Model domain setting

表 1 数值试验方案设计
Table 1 Design of numerical experiment schemes

试验	边界层参数化方案	可选的地面层参数化方案
YSU	Yonsei University参数化方案	MM5 Monin-Obukhov方案*
ACM2	非局地向上混合与局地向下混合的非对称对流模型ACM2	MM5 Monin-Obukhov方案*/Pleim-Xiu方案
MYJ	Mellor-Yamada-Janjic (Eta)湍流动能方案	Monin-Obukhov (Janjic Eta)方案*
Boulac	Bougeault-Lacarrere湍流动能方案	MM5 Monin-Obukhov方案*/ Monin-Obukhov (Janjic Eta)方案
UW	Bretherton-Park/UW湍流动能方案	MM5 Monin-Obukhov方案*/ Monin-Obukhov (Janjic Eta)方案
GBM	GBM TKE-type方案	MM5 Monin-Obukhov方案*
QNSE	准正态尺度消除方案QNSE	准正态尺度消除方案QNSE*

注:“*”表示数值试验中选择的地面层参数化方案

其中 YSU 是一阶非局地 K 闭合方案; ACM2 是显式非局地输送方案; MYJ、Boulac、UW 和 GBM 均采用局地湍流动能闭合方案; QNSE 方案在稳定层结下采用湍流谱闭合模式发展而来的 $K-\epsilon$ 模式, 在不稳定层结下采用湍流动能闭合方案。下面对各边界层参数化方案进行简要介绍。

(1) YSU (Yonsei University) 方案 (Hong et al., 2006): 一阶非局地 K 闭合方案, 运用 K 理论将湍流通量表示为涡动粘滞系数与垂直梯度的乘积 (Stull, 1991)。YSU 方案由 MRF (Medium Range Forecast) 方案 (Hong and Pan, 1996) 改进而来, 考虑大尺度涡旋的作用, 引入逆梯度输送来修订通量的计算, 并加入夹卷过程的显式处理, 以更精确地描述大气边界层中的物理过程。

(2) ACM2 (Asymmetrical Convective Model version 2) 方案 (Pleim, 2007): 非对称对流模式的第二个版本, 是一种显式的非局地输送方案, 以通量的非局地向上混合和局地向下混合为特点。该方案在 ACM1 (The original asymmetrical convective model) 方案 (Pleim and Chang, 1992) 的基础上增加一阶涡旋扩散量改进地表附近气象要素的垂直分布。对于稳定和中性边界层, ACM2 方案关闭非局地输送选项, 仅使用局地扩散 (刘羽等, 2015)。

(3) MYJ (Mellor-Yamada-Janjic) 方案 (Janjić, 1994): 采用湍流动能闭合方案。湍流动能闭合方案源于 Kolmogorov 湍流理论, 认为湍流动量交换系数与湍流动能平方根成正比 (赵鸣, 2006), 据此得到的关系式与运动方程及湍流动能方程构成闭合方程, 方程中所含二阶矩项仍然采用 K 理论进行参数化处理 (徐慧燕等, 2013)。MYJ 方案是一种经典的高阶闭合方案, 使用 Mellor and Yamada 的 1.5 阶湍流闭合方案来表征湍流, 通过诊断湍流

动能来计算湍流扩散系数, 适用于稳定和轻微不稳定的气流。该方案较早提出, 但因其概念清晰, 满足一定精度要求和节省计算时间等优点而得到广泛应用 (刘羽等, 2015)。

(4) Boulac (Bougeault-Lacarrere) 方案 (Bougeault and Lacarrere, 1989): 是为预报晴空湍流的位置与强度而引进的一种湍流动能方案。该方案在湍流动能 (turbulent kinetic energy, 简称 TKE) 预报方案的基础上加入多层城市模式, 在稳定层结下使用局地 K 理论计算湍流扩散, 即湍流交换仅发生在相邻层次之间, 当大气层结转为不稳定时, 则认为湍流交换发生在地表和边界层各层之间 (江丽芳等, 2017)。

(5) UW (University of Washington) 方案 (Bretherton and Park, 2009): 从地球系统模式 (Community Earth System Model, 简称 CESM) 中提取的湍流动能方案。目的是模拟更真实的海洋上层云覆盖下的边界层状况。该方案主要的特色是引入了一个水汽守恒的变量、一个对流层的显式的夹带闭合, 并通过诊断湍流动能来计算湍流扩散, 对湍流动能传输引入了一个新的方程, 并且统一处理所有大气柱中的湍流层。适用于干对流的边界层情况 (陈亦君, 2014)。

(6) GBM (Grenier-Bretherton-McCaa) 方案 (Grenier and Bretherton, 2001): 采用局地湍流动能闭合方案, 主要用于模拟云顶边界层情况。该方案包括了一个 1.5 阶的湍流闭合模型, 在边界层顶采用卷夹闭合技术, 有效地改进了云顶长波辐射的散射状况, 确保了浮力产生的廓线的合理准确 (陈亦君, 2014)。

(7) QNSE (Quasi-Normal Scale Elimination) 方案 (Sukoriansky et al., 2005): 在稳定层结下采

用湍流谱闭合模式发展而来的 $K-\epsilon$ 模式。 $K-\epsilon$ 模式主要是对 MY 方案 (Mellor and Yamada, 1982) 的动量以及热量扩散系数表达式进行了改进, 其优点是保留了更多的物理过程, 此外, $K-\epsilon$ 模式描述了稳定层结下气流的一些重要特性。在不稳定层结下, 仍然采用 MYJ 湍流动能闭合方案的计算方法 (Sukoriansky et al., 2005)。

地面层参数化方案的选择与边界层参数化方案有关。表 1 给出了七种边界层参数化方案相对应的可选地面层方案。为了排除地面层方案的影响, 数值试验尽量选择了相同的地面层方案, 在 YSU、ACM2、Boulac、UW 和 GBM 试验中地面层方案均选择 MM5 Monin-Obukhov 方案, 而 MYJ 和 QNSE 试验中的地面层方案则只能分别选择 Monin-Obukhov (Janjic Eta) 和 QNSE 方案。

4 数值试验结果分析

4.1 台风路径

分析发现, 不同试验模拟台风路径在模式积分 12 h 内有差异但不显著, 随着积分时间的延长, 不同边界层参数化方案所描述的次网格边界层湍流对可分辨大气运动影响的差异及其与大气相互作用的效果不断叠加, 从模拟 12 h 开始, 不同试验模

拟台风路径差异明显加大, 至模拟 24 h 时, 差异已非常显著, 其中 Boulac 与 QNSE 方案间路径差异最大, 两者模拟台风中心相距 80 km, 表明“莫兰蒂”台风路径的模拟对边界层参数化方案的选择比较敏感 (图 3a)。注意到, 几种方案模拟的台风中心几乎均较实况偏西偏北, 表明模拟台风移动速度快于实况。另外, 15 日 00:00 台风偏离了西北向的移动路径, 折向正北方向, 1 h 后, 再次逐渐调整为西北移向。Boulac 方案虽未模拟出与实况一致的折向正北方向的台风路径, 但其路径有明显向北折向的分量, 时间偏早约 3 h, 这可能与模拟台风移速快于实况, 其发展过程也早于实况有关。除 Boulac 方案外, 其余方案几乎均未模拟出台风的向北折向移动。

分析不同试验模拟台风路径误差逐时变化 (图 3b) 发现, 24 h 内偏差最大的是 QNSE 方案第 23 h 的模拟, 与实况偏差 106 km, 而该时刻模拟偏差最小的是 Boulac 方案, 与实况偏差 43 km。就 6~24 h 积分时段而言, Boulac 方案模拟台风路径最优, 平均误差为 38 km; GBM 和 YSU 其次, 平均误差分别为 49 和 50 km; MYJ、ACM2 和 UW 再次之, 平均误差分别为 53、55 和 56 km; QNSE 模拟路径最差, 平均误差为 66 km。

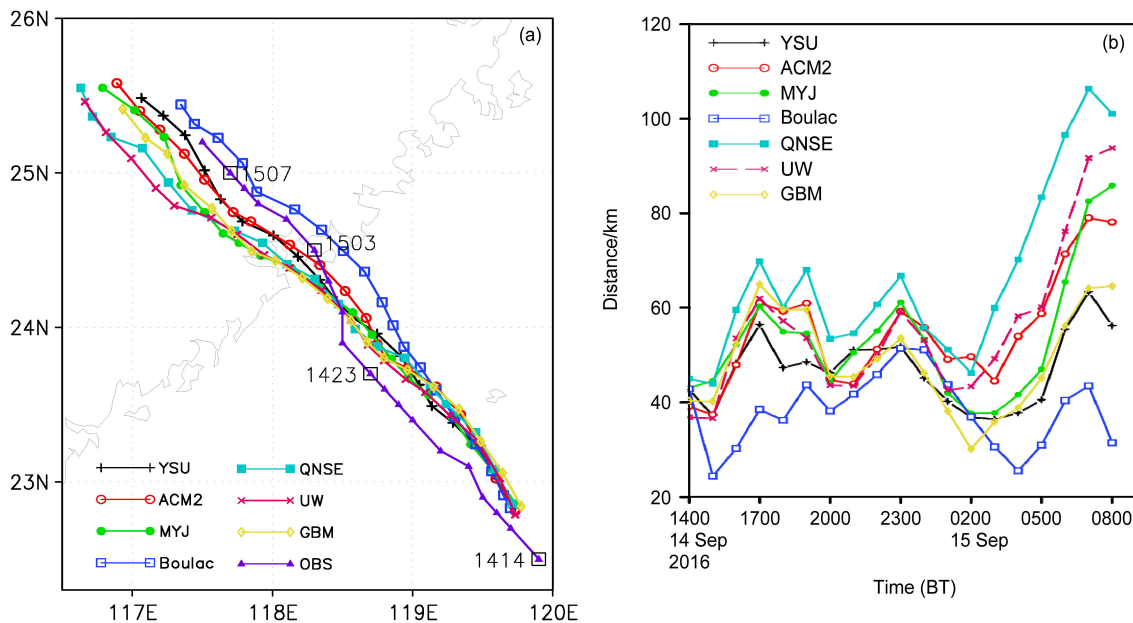


图 3 观测及七种不同边界层参数化方案模拟的 2016 年 9 月 14 日 14:00 至 15 日 08:00 1 h 间隔的 (a) 台风移动路径和 (b) 台风路径误差。
(a) 中 1414 代表 2016 年 9 月 14 日 14:00, 其他以此类推
Fig. 3 (a) Typhoon moving path observed and simulated by seven different PBL schemes and (b) typhoon moving path errors with 1-h intervals from 1400 BT 14 to 0800 BT 15 September, 2016. 1414 in (a) indicates 1400 BT 14 September, 2016, others are the same

不同试验模拟台风路径误差尽管并不相同,但其升降趋势基本一致,并且在台风登陆前(14日14:00至15日03:00),各试验模拟路径误差在24~70 km范围内,15日03:05台风登陆厦门,之后,各试验的路径误差显著加大,在随后5 h快速增大到30~106 km。

图4a给出了模拟台风路径最差与最优的QNSE与Boulac两个方案模拟的9月14日14:00至15日08:00台风中心间距逐时变化分布及其移动平均趋势,可以更加直观地发现,两个方案模拟台风中心间距在14日21:00之前先升后降,其最大距离差32 km;之后,则持续增加至15日06:00时的79 km,其后15日06:00~08:00时变化缓慢。进一步分析发现,两个方案模拟台风中心间距的3个变化阶段,即14日14:00~21:00的小幅升降、14日21:00至15日06:00的持续增加和15日06:00~08:00的缓慢变化,与台风主体所处下垫面发生变化的三个阶段密切相关。14日14:00~21:00, QNSE和Boulac方案模拟台风主体均位于洋面,14日22:00, QNSE方案模拟台风主体环流前沿已

登上陆地, Boulac方案模拟台风主体环流前沿也于2 h后登上陆地,因此从14日22:00开始,两个边界层参数化方案对台风的影响已由海洋下垫面逐步转换为海洋和陆地两种下垫面的影响。15日06:00,两个试验模拟台风主体已全部登上陆地,台风边界层下垫面再次发生改变,由受海洋和陆地两种下垫面影响转换为主要受陆地下垫面影响。行星边界层直接受下垫面影响,海洋和陆地两种下垫面属性差异巨大,其摩擦阻力、蒸发作用、热量输送、水汽输送、边界层高度与结构等均存在巨大差异, QNSE和Boulac方案采用不同的边界层参数化方案理论,因此其响应海表和地表进行边界层内部的湍流交换以及海—气、地—气间动量、热量、水汽交换必然存在差异。台风主体完全处于洋面(完全登上陆地)阶段,模式主要受不同边界层参数化方案对海表(地表)边界层过程处理的差异的影响,而在台风移近陆地到主体环流完全登上陆地阶段,台风边界层海洋和陆地下垫面兼而有之,因此,模式受到的不同边界层参数化方案对海表及地表边界层过程处理的差异的影响也是兼而有之,因

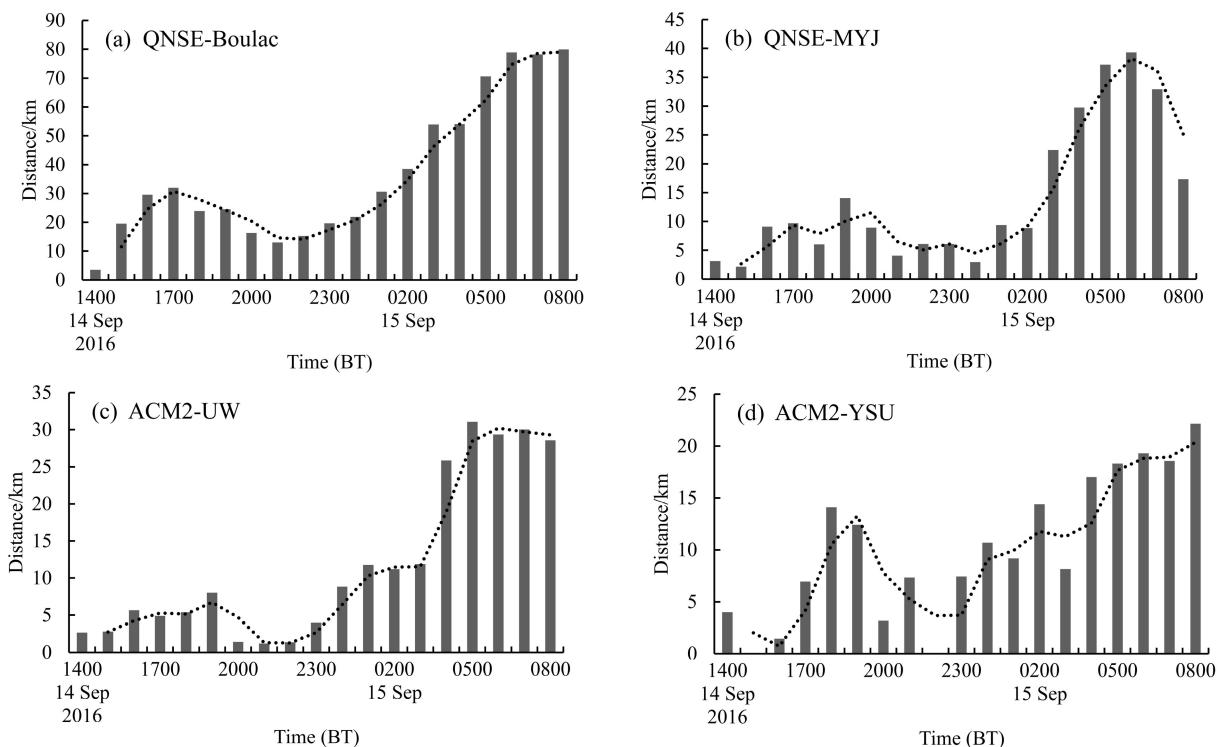


图4 (a) QNSE与Boulac、(b) QNSE与MYJ、(c) ACM2与UW、(d) ACM2与YSU不同边界层参数化方案模拟的2016年9月14日14:00至15日08:00台风中心间距(直方图)逐时分布及其移动平均趋势(点线)

Fig. 4 Distance (barb) between typhoon centers simulated by (a) QNSE and Boulac, (b) QNSE and MYJ, (c) ACM2 and UW, and (d) ACM2 and YSU PBL schemes with 1-h intervals from 1400 BT 14 to 0800 BT 15 September, 2016, and its moving averaged tendency (dashed line)

此该阶段台风模拟受边界层方案的影响要大于其他两个阶段。即不同边界层方案对登陆阶段台风的影响较其对发展期台风及完全登上陆地的台风的影响更大。

进一步给出了 QNSE 和 MYJ (图 4b)、ACM2 和 UW (图 4c) 及 ACM2 和 YSU (图 4d) 三组试验模拟的台风中心间距逐时分布, 发现与 QNSE 和 Boulac 试验组结果一致, ACM2 与 UW 和 ACM2 与 YSU 试验组台风中心间距均在 14 日 14:00~22:00 小幅升降、在 14 日 22:00~15 日 06:00 持续增加、在 15 日 06:00~08:00 缓慢变化, 也即与受单一海洋(陆地)下垫面条件影响相比, 当台风主体受海、陆两种下垫面共同影响时, 不同边界层参数化方案对台风路径的影响更大。而 QNSE 与 MYJ 方案之间的差异则在 15 日 03:00 开始明显加大, 比其他三组试验滞后约 4 h, 并在 15 日 06:00 后台风中心间距差异明显减小。究其原因, 可能与 QNSE 方案在稳定层结下采用 $K-\epsilon$ 模式, 但在不稳定层结下, 仍然采用 MYJ 湍流动能闭合方案有关。因为在台风维持和发展过程中, 不稳定层结占据主导地位, 台风登陆后, 强度快速减弱, 台风结构和环流逐渐遭到破坏, 层结逐渐趋于稳定, 因此 QNSE 与 MYJ 的差异性在台风登陆后更加凸显。

4.2 台风强度

实况资料显示, 2016 年 9 月 14 日 14:00, 超强台风“莫兰蒂”最小海平面气压为 915 hPa, 最大风速为 60 m s^{-1} , 此后在 14 日 15:00 至 15 日 03:00 台风登陆前的 13 h 内, 台风中心气压从 925 hPa 缓慢增加到 935 hPa, 相应的, 最大风速则由 55 m s^{-1} 缓慢降低到 50 m s^{-1} ; 15 日 03:05 台风登陆后, 台风中心气压迅速升高, 登陆后 5 h 内即由 935 hPa 增至 970 hPa, 而最大风速则从 50 m s^{-1} 迅速减小到 35 m s^{-1} (图 5)。

分析发现尽管不同边界层参数化方案模拟的“莫兰蒂”登陆阶段的台风中心最低气压存在不同程度差异, 最大差异达 11 hPa, 但各方案仍具有如下共性: 模拟最低气压与观测相比均偏高, 其随时间升高的特征与实况类似, 并且正确模拟出最低气压升高幅度在台风登陆前小于登陆后的特征; 但从升高趋势上明显可见, 模拟最低气压升高速度在台风登陆前各方案均大于实况, 而在台风登陆后却又不及实况 (图 5a)。很显然, 各边界层方案能够在一定程度上描述出海洋和陆地下垫面差异所引起的“莫兰蒂”台风在登陆减弱阶段最低气压升高速度在洋面小于陆地的特征, 但显然对这两种下垫面边界层湍流混合过程及其对大气影响差异的描述还远远不够。在七种边界

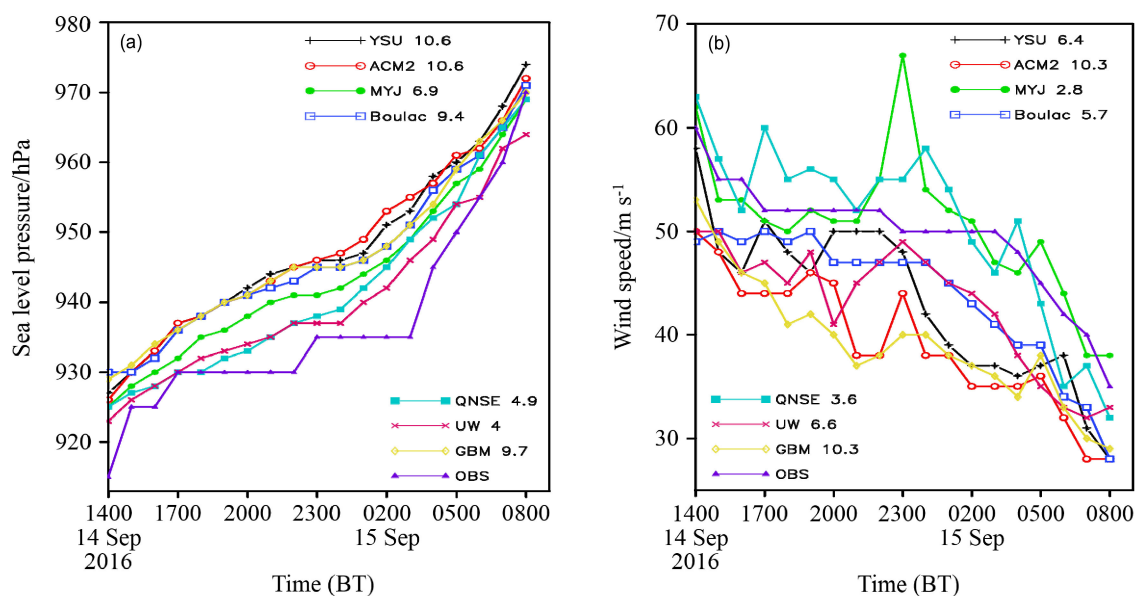


图 5 观测及七种不同边界层参数化方案模拟的 2016 年 9 月 14 日 14:00 至 15 日 08:00 1 h 间隔的台风 (a) 最低海平面气压及 (b) 最大风速
Fig. 5 Typhoon (a) minimum sea level pressure and (b) maximum wind speed observed and simulated by seven different PBL schemes with 1-h intervals from 1400 BT 14 to 0800 BT 15 September, 2016

层方案中, UW 和 QNSE 方案模拟的最低气压升高速度与实况最为接近, 14 日 14:00 至 15 日 08:00 最低气压平均绝对误差分别为 4 hPa 和 4.9 hPa; MYJ 方案次之, 其平均绝对误差为 6.9 hPa; Boulac 和 GBM 方案再次之, 其平均绝对误差分别为 9.4 hPa 和 9.7 hPa; 而 YSU 和 ACM2 方案最差, 其误差均为 10.6 hPa (图 5a)。

不同边界层方案对台风中心附近最大风速的逐时模拟 (图 5b) 差异明显, 24 h 最大差值达 27 m s^{-1} 。但与各方案模拟台风中心最低气压的逐时分布一致偏大于实况不同, 不同边界层方案对最大风速的模拟结果可分为两类: 一类是 YSU、UW、GBM、Boulac、ACM2 方案, 模拟最大风速始终小于观测值, 其中 GBM 和 ACM2 方案偏小程度最甚, 与实况最大偏差可达 15 m s^{-1} , 平均绝对误差高达 10.3 m s^{-1} ; 而 MYJ 和 QNSE 方案则属于另一类, 模拟最大风速与观测值相比有大有小, MYJ 方案除第 15 h 模拟最大风速显著偏大外, 其余偏差值在 $3 \sim 4 \text{ m s}^{-1}$ 。MYJ 和 QNSE 方案模拟最大风速的平均绝对误差分别为 2.8 和 3.6 m s^{-1} , 在各方案中相对最小。从七个试验模拟的台风中心附近最大风速与观测的差值分布 (图 6) 可以更加清楚地看到, 就台风中心附近最大风速的模拟效果来说, MYJ 方案最好, QNSE 方案次之, 而 GBM 和 ACM2 方案最差。

QNSE 方案在“莫兰蒂”台风登陆过程中模拟最低气压和最大风速在七种边界层方案中均为次优, 这可能由于 QNSE 方案显式地区分了由于层结引

起的质量水平与垂直输送的差别, 当大气层结不稳定时采用湍流动能闭合方法, 使得计算更精确 (温晓培等, 2016)。

4.3 台风降水

图 7 是观测和各试验模拟的 2016 年 9 月 15 日 08:00 24 h 累积降水量分布。实况降水呈团状覆盖福建大部分区域, 沿福建海岸线并向内陆伸展自南向北分布有 3 个 100 mm 以上强降水中心, 分别是位于厦门至泉州一带的台风内核大暴雨区、福州至宁德一带以及柘荣一带的台风外围螺旋雨带造成的大暴雨区, 分别称为 A、B、C 大暴雨区 (图 7 方框处), 其最大降水量分别为 280.2、289 及 199.4 mm, B 区降水强度略强于 A 区, 但台风内核大暴雨区较台风外围螺旋雨带大暴雨区范围广得多, 其中距离台风主体较远的柘荣一带的降水范围和强度最小。

就降水分布的整体形态而言, 各试验均模拟出了福建境内台风主体降水及其外围螺旋雨带降水, 与观测的空间相关系数在 0.6884~0.7441 (表 2), 不同试验降水模拟差异主要体现在各量级降水北边界、强降水落区与极值上。总体而言, Boulac 方案明显优于其他方案, 主要体现在以下几点:

(1) 各试验模拟不同量级降水北边界均较实况偏北, 其中 Boulac 方案偏北程度最小, 与实况最为接近。台风路径模拟分析表明, 各试验模拟台风路径均较实况偏西偏北, 其中 Boulac 方案偏离实况的程度最小, 因此其模拟降水与实况最为吻合, 而其他方案则向西北方向推进明显。

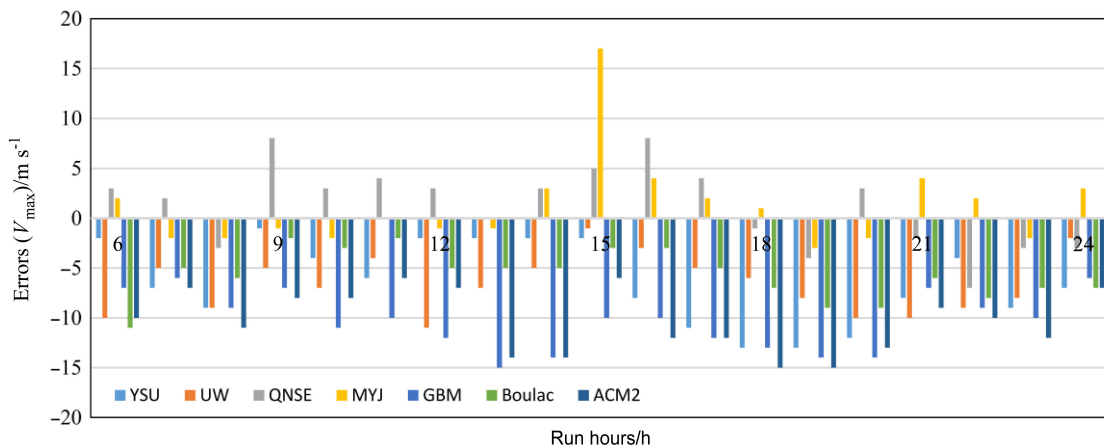


图 6 七种不同边界层参数化方案模拟的 2016 年 9 月 14 日 14:00 至 15 日 08:00 1 h 间隔的台风中心附近最大风速误差

Fig. 6 Simulated errors of the maximum wind speed near the typhoon center by seven different PBL schemes with 1-h intervals from 1400 BT 14 to 0800 BT 15 September, 2016

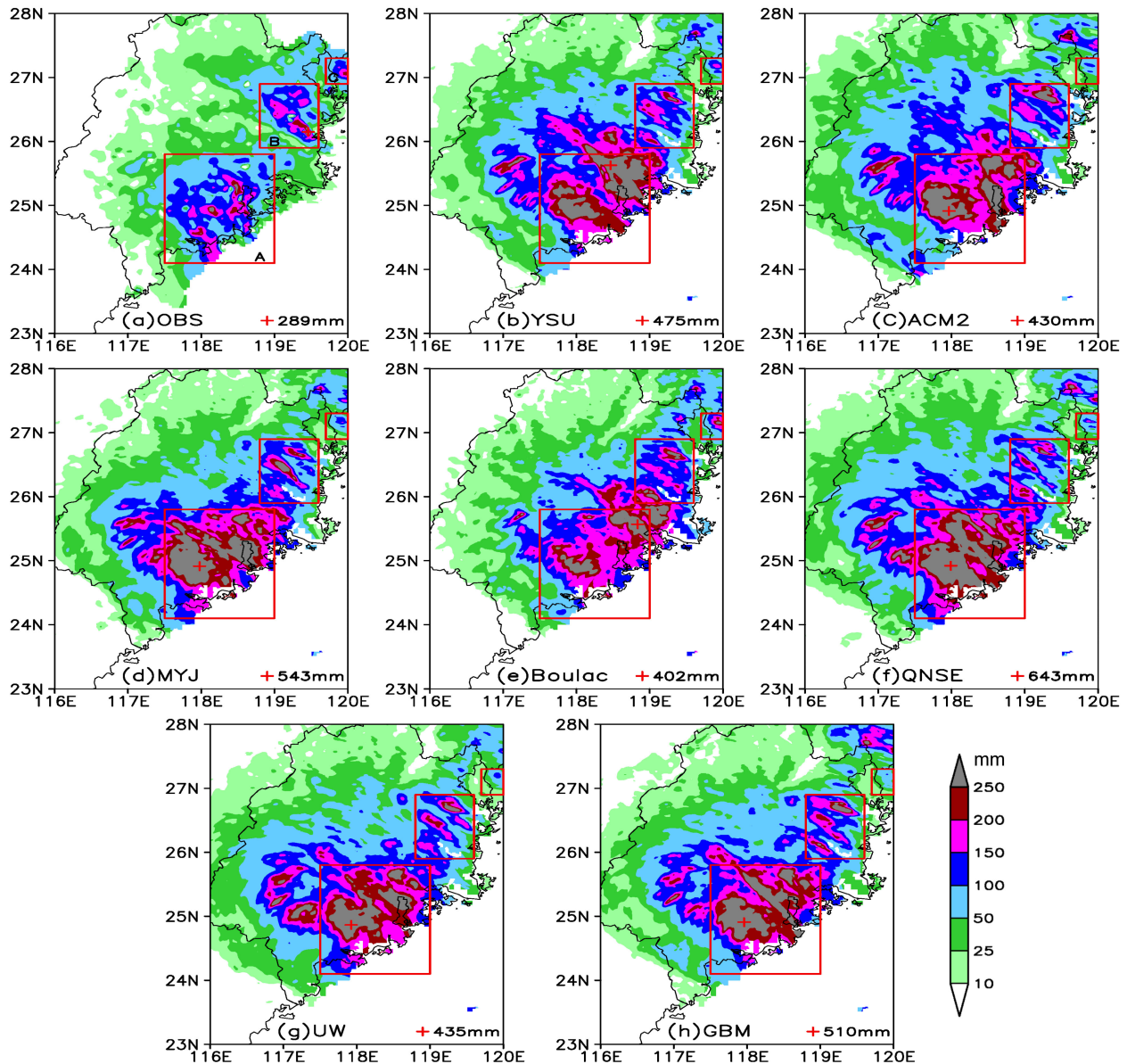


图7 2016年9月14日08:00至15日08:00观测及七种不同边界层参数化方案模拟的24 h累积降水量（红色方框表示实况大暴雨区，红色+字为最大降水量位置）分布：（a）实况；（b）YSU；（c）ACM2；（d）MYJ；（e）Boulac；（f）QNSE；（g）UW；（h）GBM

Fig. 7 24-h accumulated precipitation of the observation and simulation with seven different PBL schemes during 0800 BT 14 to 0800 BT 15 September, 2016: (a) Observation; (b) YSU; (c) ACM2; (d) MYJ; (e) Boulac; (f) QNSE; (g) UW; (h) GBM. The red box denotes observed heavy rainstorm. The red cross denotes the location of maximum precipitation

（2）A、B、C三个区域24 h累积降水观测的平均值分别为95.1、94.6及97.3 mm，各试验对A区降水模拟均偏强，强度模拟最接近的Boulac方案平均值为163.1 mm，其次ACM2方案为171.4 mm，最大的MYJ和QNSE方案模拟值分别为208.6及201.6 mm。对于B区的模拟，QNSE和UW方案最接近，分别为104.7和110 mm，ACM2和Boulac方案模拟偏强最甚，分别为123.3和130.6 mm。对

于C区，除Boulac方案模拟的100.3 mm量级与实况非常接近外，其余六种方案模拟均明显偏弱，数值为43.2~66 mm。

除B区Boulac方案模拟的区域平均降水量大于实况，为七种方案最强外，对于A、C两个区域的降水量平均强度的模拟均最接近实况。进一步考察发现，Boulac方案对B区模拟偏强主要在于对主体降水（A区）和螺旋雨带（B区）间的弱降水

表 2 七种不同边界层参数化方案模拟的24 h累积降水与观测降水的空间相关和TS评分

Table 2 Threat scores and spatial correlation coefficient of 24-h accumulated precipitation between the observation and simulation from seven different PBL schemes

		不同边界层参数化方案						
	降水等级/mm	YSU	ACM2	MYJ	Boulac	QNSE	UW	GBM
TS评分	$R>1$	0.8948	0.8845	0.8953	0.9127*	0.8803	0.8819	0.9056
	$R>10$	0.7217	0.6801	0.7318	0.7835*	0.6841	0.6790	0.7176
	$R>25$	0.5796	0.5135	0.5818	0.6496*	0.5219	0.5122	0.5520
	$R>50$	0.4352	0.3907	0.4548	0.5140*	0.4029	0.4103	0.4120
	$R>100$	0.2974	0.2629	0.3055	0.3296*	0.2665	0.2824	0.2997
	$R>200$	0.01818	0.0283	0.0236	0.0105	0.0292	0.0339	0.0345*
TS评分	$0.1\leq R<50$	0.6063	0.5291	0.6254	0.6717*	0.5471	0.5663	0.5774
	$50\leq R<100$	0.1429	0.1049	0.1095	0.1737*	0.1037	0.1018	0.1092
	$100\leq R<200$	0.1622	0.1230	0.1178	0.2378*	0.1031	0.1335	0.1331
	$200\leq R<400$	0.0184	0.0283	0.0240	0.0105	0.0303	0.0342	0.0351*
空间相关		0.6884	0.7183	0.7441*	0.7258	0.7084	0.7083	0.7244

注: 上标*表示方案中的最优者

区没有很好地区分出来。

图 8 给出了各试验模拟的 A、B、C 三个区降水极值大小及其相对于观测降水中心极值位置的距离分布, 可见, 对降水极值大小和位置的模拟, 不同边界层方案有较大差异, 各方案对 A 区降水极值 (280.2 mm) 的模拟均偏强, Boulac 方案模拟的降水极值为 402.2 mm, 最接近实况, QNSE 方

案模拟降水极值为 643.2 mm, 远高于实况; 对 B 区降水极值 (289 mm) 的模拟, 各方案模拟极值在 274.2~409.2 mm, 其中 Boulac 方案模拟最优, 为 297.8 mm, GBM 方案模拟最差; 对 C 区降水极值 (199.4 mm) 的模拟, 除 Boulac 方案模拟 285.9 mm 强于实况外, 其余方案均弱于实况, 最弱的是 GBM 方案模拟仅为 104 mm。对于极值位置的模拟, Boulac 方案对 C 区降水极值位置的模拟最佳, 而对 A 区和 B 区的模拟均位列第二。因此, 综合考量对三个区降水极值大小和位置的模拟, Boulac 方案表现最优。

TS 评分也表现出与上述结果的一致性。将图 1b 所示的雨量站 24 h 累积雨量插值到 D03 区域, 与各试验预报结果进行 TS 评分和空间相关统计检验 (表 2)。TS 评分采用开口和闭口两种方式。开口式降水等级划分为>1、10、25、50、100、200 mm 的 6 个等级, 闭口式则将降水等级划分为有降水发生但在暴雨量级以下 (≥ 0.1 mm 且 < 50 mm)、暴雨 (≥ 50 mm 且 < 100 mm)、大暴雨 (≥ 100 mm 且 < 200 mm) 和特大暴雨 (≥ 200 mm 且 < 400 mm) 4 个等级。由表 2 可见, 对于开口式的>1、10、25、50、100 mm 的降水等级以及闭口式的暴雨以下、暴雨、大暴雨量级的降水, Boulac 方案最优; 而对于开口式的>200 mm 和闭口式的特大暴雨量级的降水, 则 GBM 方案最优。从降水的空间相关来看, MYJ 方案最优, Boulac 方案次之。

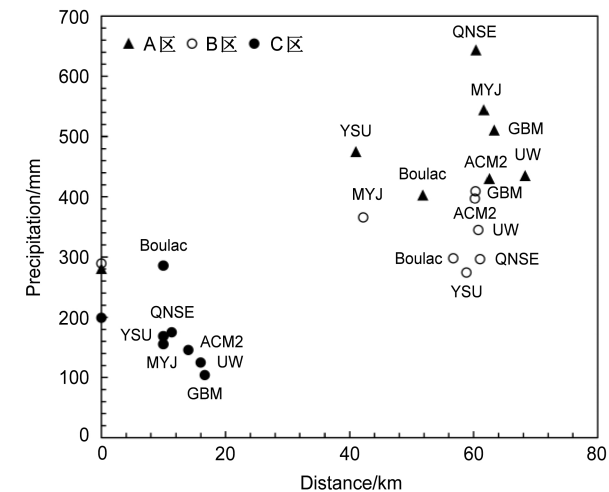


图 8 七种边界层方案模拟的 2016 年 9 月 15 日 08:00 24 h 累积降水量极值大小及其相对于观测降水中心极值位置的距离 (纵坐标上点代表观测)

Fig. 8 Maximum 24-h accumulated rainfall simulated by seven different PBL schemes and its distance to observed rainfall center at 0800 BT 15 September, 2016. Point at vertical coordinate denotes observation

4.4 综合影响

将不同方案模拟台风路径、最低气压、最大风速、24 h 降水 TS 评分和降水空间相关从效果最优到最差进行排名（表 3），发现尽管没有某种边界层方案在各项指标中均排在最优或最差，但将前 3 和后 3 排名中各方案出现的次数进行统计，可发现如下规律：（1）排名前 3 中，Boulac 和 MYJ 各出现 8 次，YSU 和 GBM 各出现 4 次，QNSE 出现 2 次，UW 出现 1 次，ACM2 出现 0 次；排名后 3 中，Boulac 和 MYJ 各出现 0 次，YSU 和 GBM 各出现 2 次，QNSE 出现 7 次，UW 和 ACM2 各出现 8 次。（2）以上统计结果表明，综合台风路径、强度和降水模拟情况，Boulac 和 MYJ 方案最优，其中 Boulac 方案在台风路径和降水模拟上更优，而 MYJ 方案在台风强度模拟上更优；YSU 和 GBM 方案次之，而 QNSE、UW 和 ACM2 方案相对最差。

4.5 感热通量和潜热通量特征

4.5.1 潜热通量特征

感热和潜热的海气交换和动量交换对台风的发生发展起十分重要的作用，感热和潜热输送是边界层的主要物理过程，那么边界层方案的不同对“莫兰蒂”台风的潜热通量和感热通量有怎样的影响呢？

考察发现，由于采用的边界层方案不同，积分 1 h 后，尽管各方案潜热通量和感热通量大体分布特征是相似的，但其量值上的差异已非常显著，不容忽视：QNSE 方案潜热通量和感热通量均明显大于其他方案，其最大值分别为 4300 W m^{-2} 和 900 W m^{-2} ；模拟最弱的则是 UW 方案，其最大值分别为 1600 W m^{-2} 和 300 W m^{-2} ，与 QNSE 方案

相比差异悬殊（图略）。各方案潜热通量均远大于感热通量，说明潜热通量比感热通量对台风的发生发展起到更重要的作用。

随着积分时间的延长，各方案模拟的潜热通量和感热通量不仅在量值上存在显著差异，并逐渐在结构上出现较大差异。下面以积分第 12 h（即 9 月 14 日 20:00）为例，由潜热通量、感热通量及 10 m 风速等近地层物理量分布特征（图 9）可见，潜热通量在海洋和陆地上均为正值，其主要分布形势为台风中心数值最低，由中心向外逐渐升高，达到最高值后又向外逐渐减小为 0。14 日 20:00，各方案潜热通量的最高值均位于靠近陆地的台风西侧，其中 QNSE 方案计算的潜热通量最高，最大值超过 2100 W m^{-2} ，约为其他方案的 2~4 倍；MYJ 和 Boulac 方案的潜热通量大小接近，最大值在 $1000 \sim 1100 \text{ W m}^{-2}$ ，而 GBM 方案最小，最大值约 500 W m^{-2} ，其余方案最大值在 $700 \sim 800 \text{ W m}^{-2}$ 。在随后积分过程中，对潜热通量的模拟 QNSE 方案始终比其他方案大得多。对 24 h 累积降水量的模拟（图 7）QNSE 方案也是各方案中最大的。以上分析可见，不同边界层方案对潜热通量和降水影响显著，而且这种影响具有相互关联性，即潜热通量的大小与降水的强弱密切相关。以 QNSE 方案为例，该方案潜热通量明显偏大于其他方案，而潜热通量越大，则表示向上输送的水汽越多，在一定条件下触发对流后，降水量也就越大，因此 QNSE 方案台风主体 24 h 累积降水极值达 643.2 mm 远高于其他方案。这与王晨稀（2013）得到的结论一致。

QNSE 方案模拟的 24 h 累积降水量和潜热通量在各方案中最大，其降水强度远高于实况，潜热通量是其他方案的 2~4 倍，而其 1、10、25、50、

表 3 七种不同边界层参数化方案模拟的台风路径、强度、降水 TS 评分和空间相关系数排名

Table 3 Rankings of typhoon moving track, intensity, precipitation threat score, and spatial correlation coefficient simulated using seven different PBL schemes

	最低气压	最大风速	台风路径	不同降水等级 TS 评分					降水空间相关
				$R > 1 \text{ mm}$	$R > 10 \text{ mm}$	$R > 25 \text{ mm}$	$R > 50 \text{ mm}$	$R > 100 \text{ mm}$	
1	UW	MYJ	Boulac	Boulac	Boulac	Boulac	Boulac	Boulac	MYJ
2	QNSE	QNSE	GBM	GBM	MYJ	MYJ	MYJ	MYJ	Boulac
3	MYJ	Boulac	YSU	MYJ	YSU	YSU	YSU	GBM	GBM
4	Boulac	YSU	MYJ	YSU	GBM	GBM	GBM	YSU	ACM2
5	GBM	UW	ACM2	ACM2	QNSE	QNSE	UW	UW	QNSE
6	ACM2	GBM	UW	UW	ACM2	ACM2	QNSE	QNSE	UW
7	YSU	ACM2	QNSE	QNSE	UW	UW	ACM2	ACM2	YSU

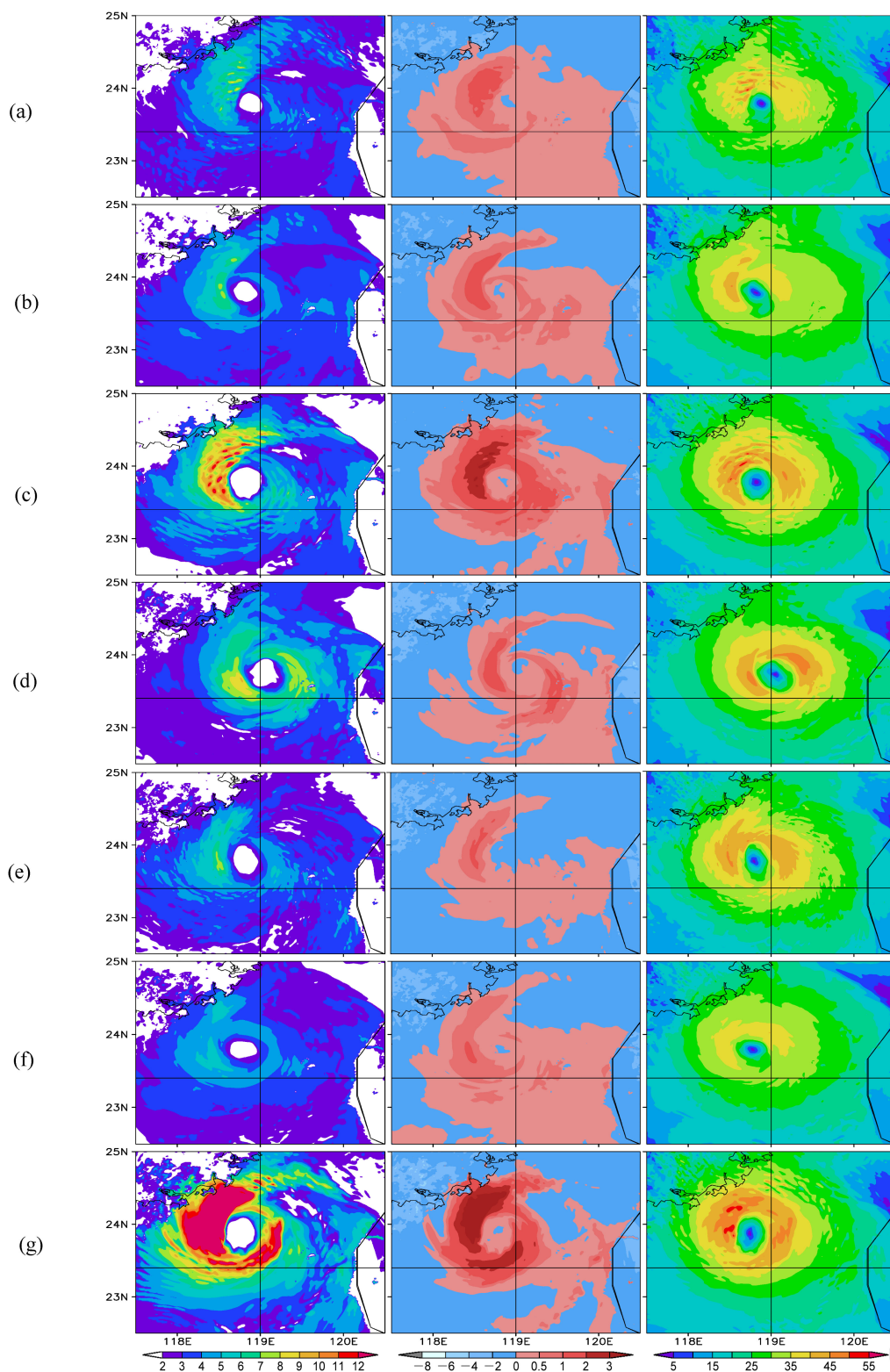


图9 七种不同边界层参数化方案模拟的2016年9月14日20:00潜热通量(左列;单位: 10^2 W m^{-2})、感热通量(中间列;单位: 10^2 W m^{-2})和10 m风速(右列;单位: m s^{-1})分布:(a) YSU; (b) ACM2; (c) MYJ; (d) Boulac; (e) UW; (f) GBM; (g) QNSE。图中横线和竖线分别为观测的台风中心所在的纬度和经度

Fig. 9 Latent heat flux (left panel, units: 10^2 W m^{-2}), sensible heat flux (middle panel, units: 10^2 W m^{-2}) and speed at 10-m height (right panel, units: m s^{-1}) simulated by (a) YSU, (b) ACM2, (c) MYJ, (d) Boulac, (e) UW, (f) GBM and (g) QNSE PBL schemes at 2000 BT 14 September, 2016. Horizontal and vertical lines denote the latitude and longitude of observed typhoon center, respectively

100 mm 降水量级 TS 评分及降水空间相关排名均位于后列, 因此, 可以推断, QNSE 方案潜热通量异常偏高导致模式产生了虚假的降水现象。MYJ 和 Boulac 方案的潜热通量在模拟的整个过程中量值都是最接近的, 这也较好地解释了为什么对于 24 h 累积降水的形态、TS 评分及空间相关来说, MYJ 和 Boulac 方案均为最优。

4.5.2 感热通量特征

感热通量的分布形势与潜热通量不同, 其数值有正有负。感热通量在台风中心接近 0 W m^{-2} , 由台风中心向外逐渐增加, 在台风最大风速区附近达到最大值, 之后, 在台风外区逐渐减小。9 月 14 日 20:00 QNSE 方案感热通量高达 400 W m^{-2} , MYJ 方案次之, 达 300 W m^{-2} , 其余方案相对较小, 约 100 W m^{-2} 。各方案陆地上感热通量基本为负值, 且其绝对值最大值 ($450 \sim 900 \text{ W m}^{-2}$) 远大于台风区感热通量正值的最大值 ($100 \sim 400 \text{ W m}^{-2}$)。邓国等 (2005) 认为洋面上通过感热的方式加热台风, 为台风继续提供能量, 而陆地上不仅摩擦消耗台风的机械能量, 而且也因为离台风较远的陆地温度低于台风附近洋面温度, 陆地气温偏低, 陆地从台风吸收热量, 感热通量作用降低了台风能量。

各方案模拟的 10 m 风速呈环状分布, 台风眼处速度几乎为 0, 向外逐渐增大, 在眼壁处达到最大值后向四周逐渐减小, 西北侧大风分布范围较大, 其中 QNSE 方案风速分布范围最大, MYJ 和 Boulac 方案次大, GBM、ACM2 和 YSU 方案则最小。QNSE 方案模拟的眼壁处风速最强, 达 55 m s^{-1} , YSU、MYJ 方案模拟的风速大小为 50 m s^{-1} 左右; ACM2、UW、Boulac 方案模拟为 45 m s^{-1} , GBM 方案模拟的 10 m 风速最弱, 最大值为 40 m s^{-1} 。

观测资料显示, 9 月 14 日 20:00, 台风中心位于 (23.4°N , 119°E), 除 Boulac 方案模拟台风中心与实况在同一经度但纬度偏北外, 其余六种方案均较实况台风中心偏西偏北。Boulac 方案模拟台风中心最接近实况, QNSE 方案偏离实况最远, 其余五种方案介于其中。

由图 9 可见, 台风发生发展的位置均为潜热、感热正值的大值区。潜热通量的分布与 10 m 风速的分布相似, 10 m 风速越强的区域, 潜热输送也越强。QNSE 方案的潜热通量最大, 对应的降水量也最大, MYJ 方案的潜热通量次之, 降水量也次之。另外, 当边界层方案变化时, 感热通量的变化

与台风强度的变化基本一致。不同边界层参数化方案的感热通量的差异越大, 模拟的台风强度差异往往也越大。

对比七种边界层方案模拟的 1~20 h 时效内感热通量最大值和最大风速的逐时分布 (21 h 后台风已登陆, 两者相关关系已不明确; 图 10), 可发现如下特征:

(1) 各边界层方案模拟台风中心附近最大风速与感热通量最大值的演变具有高度正相关性。ACM2、GBM、YSU、Boulac、UW、QNSE 及 MYJ 方案两者相关系数分别为 0.980145、0.97748、0.970574、0.942773、0.942374、0.911923 和 0.908954, 均达到 0.001 显著性水平。

(2) 模式积分初始时刻, 实况最大风速为 62 m s^{-1} , 模式初值为 51 m s^{-1} , 小于实况, 但模式积分 1 h 后, 各方案模拟的最大风速均快速增加, 且明显高于实况, 如最高的 QNSE 和 MYJ 方案模拟达到 93 m s^{-1} 和 94 m s^{-1} , 最小的 UW 方案也达到 74 m s^{-1} 。显然地, QNSE 和 MYJ 方案感热通量最大值明显高于其他方案, 因而导致其最大风速也远高于其他方案。但是什么原因导致模式积分 1 h 后最大风速快速增长 $23 \sim 43 \text{ m s}^{-1}$ 并不清楚, 可能与模式 spin-up 期间模式变量相互不协调有关。经过 spin-up 协调调整, 模式积分 4 h (QNSE 和 MYJ 方案为 6 h) 时, 各方案模拟的最大风速与实况接近。

(3) 各方案最大风速在初始时刻相同, 1 h 后即出现非常大的差异, 这与不同边界层方案模拟感热通量出现显著差异有关。如积分 1 h 后, 感热通量最强与最弱的 QNSE 和 UW 方案模拟的最大感热通量分别为 997.8 和 305.4 W m^{-2} , 两者模拟最大风速则分别为 93 m s^{-1} 和 74 m s^{-1} 。

(4) 在模式积分 4 h (6 h) ~ 20 h 期间, 除 QNSE 和 MYJ 方案模拟最大风速略高于或接近实况外, 其余五种方案均小于实况, 很显然, 这与 QNSE 和 MYJ 方案的感热通量最大值在整个积分过程中明显高于其他方案有密切关系。进一步考察发现, QNSE 方案感热通量基本在每个时刻均大于 MYJ 方案, 最大可相差 240 W m^{-2} , 而从图 5b 可知 MYJ 方案最大风速误差最小, QNSE 方案次小, 因此可以推断对感热通量的模拟, QNSE 方案略偏高, MYJ 方案最为适中, 而其他五种边界层方案则显著偏小。

以上讨论可见, 从感热通量分布而言, QNSE

和 MYJ 方案属于量值较为合理的一类, 而其余五种边界层方案属于量值偏弱且较为接近的一类。进一步考察 QNSE 和 MYJ 两种边界层方案感热通量逐时演变, 发现两者感热通量最大值非常类似, 导致两者模拟的最大风速类似, 且 MYJ 方案最大风

速优于 QNSE 方案 (图略)。

以 MYJ 方案为例, 进一步讨论感热通量与最大风速的关系 (图 10b)。前文分析已经指出, MYJ 方案模拟台风中心附近最大风速在七个边界层方案中最优, 在经过 6 h 的 spin-up 协调调整后,

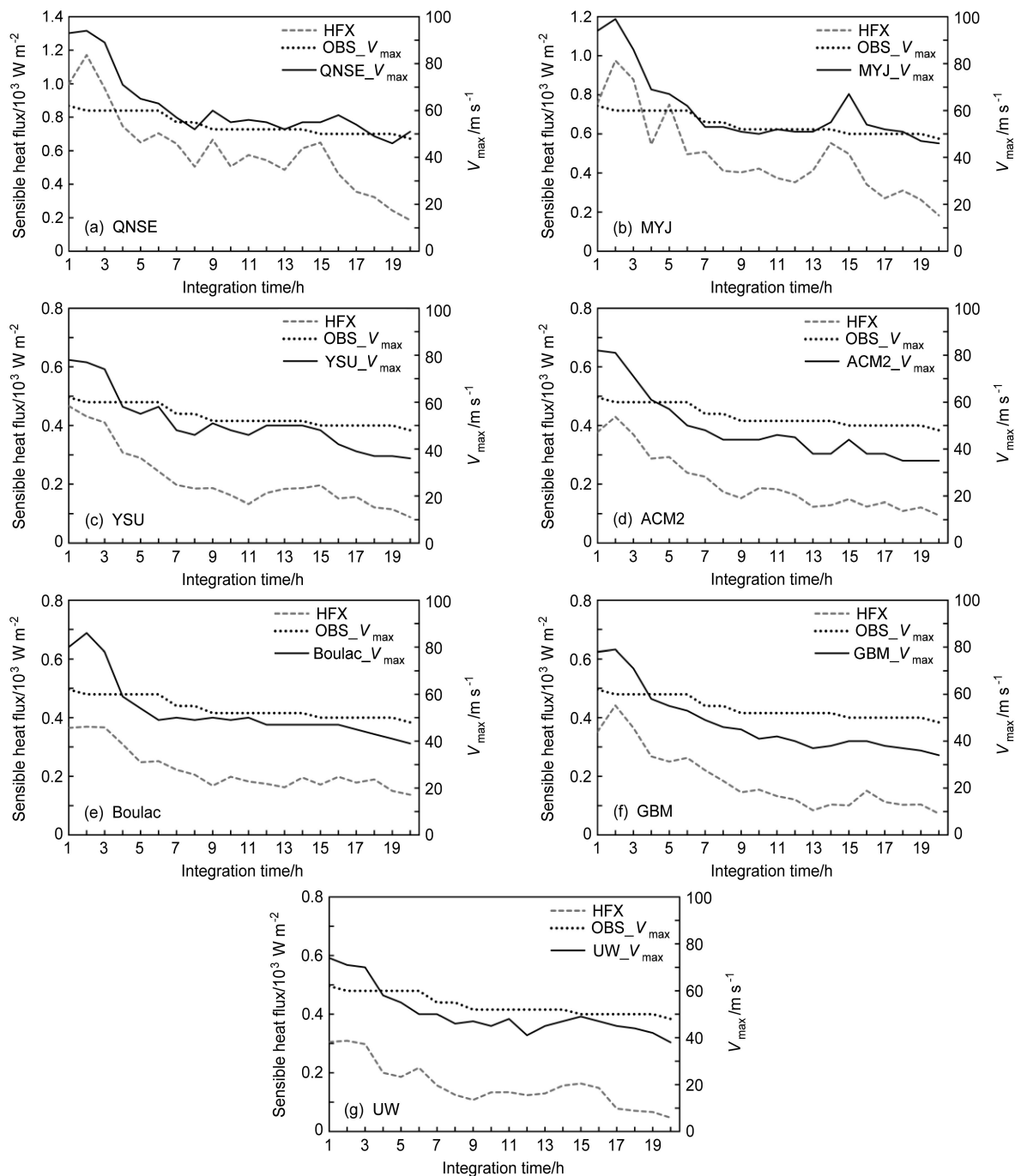


图 10 七种不同边界层参数化方案模拟的感热通量最大值 (虚线)、最大风速 (实线) 与实况最大风速 (点线) 的逐时分布: (a) QNSE; (b) MYJ; (c) YSU; (d) ACM2; (e) Boulac; (f) GBM; (g) UW

Fig. 10 Hourly observed maximum wind speed (dotted lines), the maximum of sensible heat flux (dashed lines) and speed at 10-m height simulated by (a) QNSE, (b) MYJ, (c) YSU, (d) ACM2, (e) Boulac, (f) GBM and (g) UW PBL schemes

在随后的 7~24 h 模拟中, 除第 15 h 的模拟比实况显著偏大 17 m s^{-1} 外, 其余时次与实况的偏差在 $-3 \sim 4 \text{ m s}^{-1}$, 相对较为接近 (图 6)。如图 10b 所示, MYJ 方案模拟第 14~15 h 最大风速突然明显加大, 分析发现这与该时刻感热通量的突然增强密切相关。那么, 是什么原因导致感热通量突然增强呢? 或者说, 感热通量突然增强的时刻有何特殊性呢? 考察后发现, 感热通量突然增强的时刻, 此时台风主体环流前沿刚登上陆地, 台风主体环流由受到单一海洋下垫面影响向海—陆下垫面共同影响转换。邓国等 (2005) 指出, 陆地上感热通量作用会降低台风能量, 而此时, 陆地上负的感热通量的绝对值最大值远小于海洋上正的感热通量的最大值。因此, MYJ 方案计算的台风主体感热通量在海洋和陆地上的差异的不足使得模式不能够准确描述所发生的天气现象。对比其他边界层方案, 发现台风主体在由受海洋下垫面影响向受海、陆下垫面共同影响转换的过程中, 均不同程度存在感热通量在持续减弱阶段中突然增强, 同时伴随着模拟的最大风速在持续减弱过程中突然加大的现象。而实况“莫兰蒂”在登陆阶段最大风速持续减弱, 显然, 各试验模拟出的台风中心附近最大风速突然加大现象均与实况不符。因此可以推断, 在台风主体环流靠近陆地, 开始转受海洋和陆地下垫面共同作用影响时, 这七种边界层方案对海、陆感热通量的计算, 及其两者相互作用影响的考虑均存在不足。

同时, 进一步分析了图 5a 所示最低气压升高速率 QNSE 方案比 MYJ 方案更接近实况的原因, 考察后发现, QNSE 方案在陆地上负的感热通量的绝对值较大 (图 9g), 海陆差异大, 而 MYJ 方案在陆地上负的感热通量的绝对值则小得多 (图 9c), 海陆差异不及 QNSE 方案, 因此造成 QNSE 方案最低气压升高速率大于 MYJ 方案, 也更接近于实况。

4.6 边界层结构

边界层过程主要通过改变湍流层热动力结构, 将热量和水汽向高层输送。为了对比不同边界层参数化方案对边界层高度、边界层热量和水汽输送情况的模拟, 以登陆台风引发的陆地上台风主体降水中心区域 ($24.7^{\circ}\text{N} \sim 25.1^{\circ}\text{N}$, $118.1^{\circ}\text{E} \sim 118.4^{\circ}\text{E}$) 为例, 开展各试验对降水区平均边界层结构的影响分析。以 CFSR 再分析资料作为实况, 但由于该资料不包含边界层高度, 所以用 GFS 分析资料作为边界层高度的实况。

边界层高度是反映边界层结构的重要变量。图 11 给出了实况和模拟的 2016 年 9 月 14 日 08:00 至 15 日 08:00 区域平均的边界层高度的时间演变。从间隔 6 h 的 GFS 分析资料可见, 实况最大边界层高度呈现明显的双峰分布, 14 日 14:00 和 15 日 02:00 边界层高度较高, 达 1530 m 左右; 14 日 08:00 和 15 日 08:00 次之, 约 1000 m; 而 14 日 20:00 较低, 为 724 m。边界层高度白天高于夜间, 这与白天湍流混合作用强于夜间的事实相符合。

各试验模拟边界层高度差异极大。QNSE 方案模拟边界层高度达到 2086~4724 m, 远高于实况及其他方案; Boulac、UW 和 GBM 方案模拟则较实况偏低, 特别是 GBM 方案, 模拟最大边界层高度仅为 215 m; YSU 方案模拟 15 日 00:00 前边界层高度位相与实况相反, 也即夜间边界层高度高于白天, 这与实况不符; 相较而言, MYJ 和 ACM2 方案模拟边界层高度与实况最为接近。研究表明, 在不同下垫面及天气条件下, 各边界层方案模拟边界层高度往往存在不同程度的误差, Hu et al. (2010) 认为产生误差的主要原因在于不同边界层方案的湍流混合方式、边界层高度的计算方法各不相同, 因

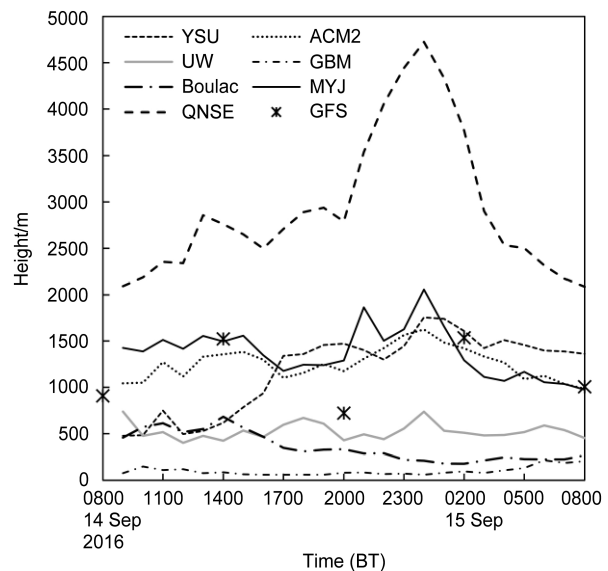


图 11 2016 年 9 月 14 日 08:00 至 15 日 08:00 GFS 分析和七种不同边界层参数化方案模拟的区域平均 ($24.7^{\circ}\text{N} \sim 25.1^{\circ}\text{N}$, $118.1^{\circ}\text{E} \sim 118.4^{\circ}\text{E}$) 边界层高度的时间演变

Fig. 11 Temporal evolution of regional averaged ($24.7^{\circ}\text{N} \sim 25.1^{\circ}\text{N}$, $118.1^{\circ}\text{E} \sim 118.4^{\circ}\text{E}$) PBL heights analyzed by GFS and simulated by seven different PBL schemes from 0800 BT 14 to 0800 BT 15 September, 2016

而其模拟垂直方向上的热量、水汽和动量等物理量也会发生很大的变化, 导致模拟的边界层高度产生较大的差异。

接下来考察区域平均的位温和水汽混合比垂直廓线分布。由 9 月 14 日 14:00 水汽混合比廓线分布 (图 12b) 可见, 实况水汽混合比随高度递减, 廓线分布总体特征如下: 100 m 以下的近地层水汽随高度递减迅速, 湍流混合最强; 100~500 m 的混合层上层水汽混合比随高度递减的速率略低于近

地层, 但递减率仍较大; 500~1000 m 的中性层水汽混合比递减速率明显降低; 至 1000 m 以上的弱湍流层, 水汽混合比递减率再次明显加大。

各方案模拟边界层内水汽混合比廓线与实况相比, 均存在一定程度的差异, 特别是 1000 m 以下低层大气差异更为明显, 普遍比实况偏小 2 g kg^{-1} 。从廓线分布形态来看, 各方案对 500 m 以上中性层和弱湍流层水汽廓线形态描述与实况较为一致, 但对 500 m 以下的边界层低层水汽廓线的描述差异较

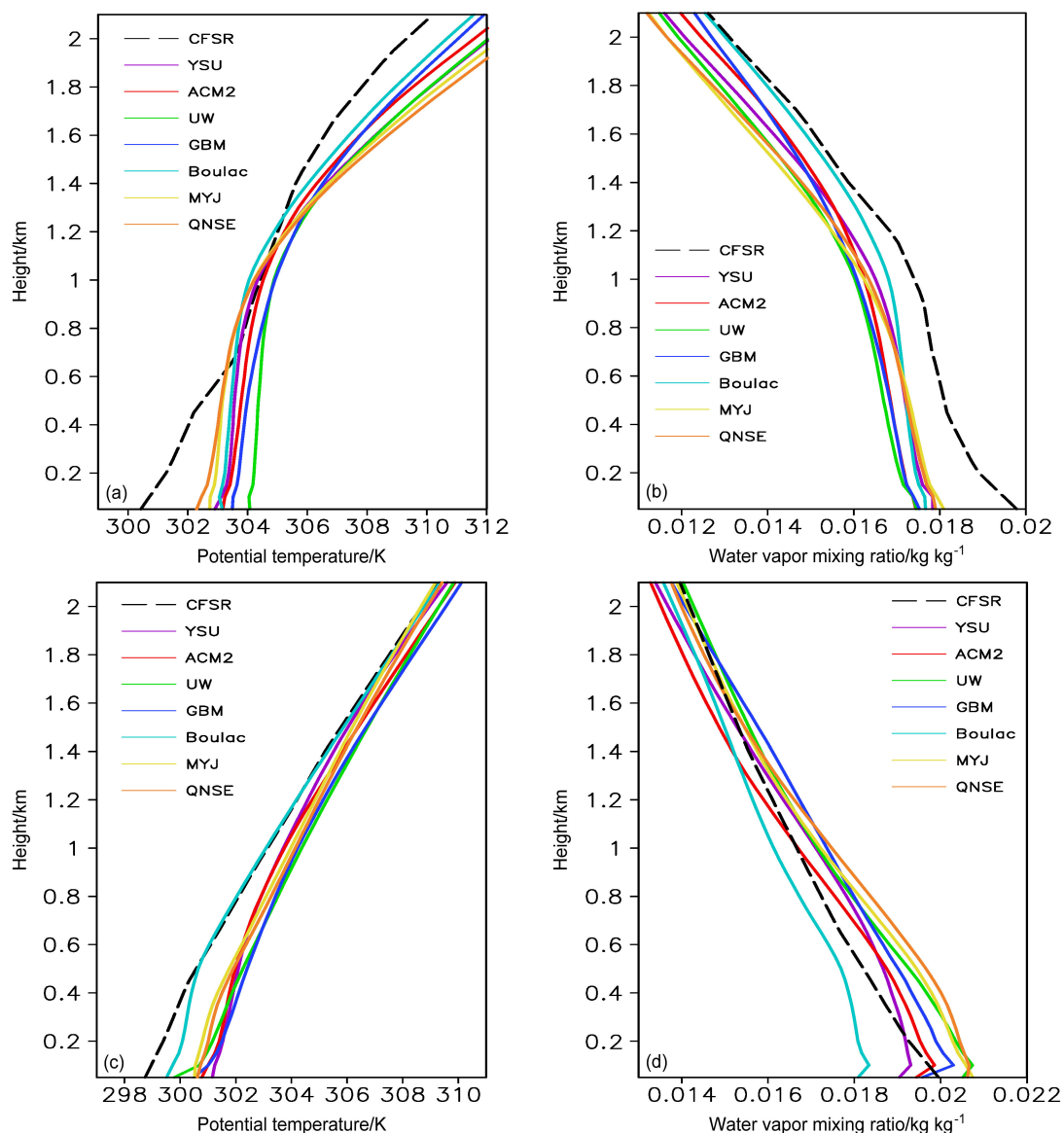


图 12 CFSR 分析和七种不同边界层参数化方案模拟的 2016 年 9 月 (a, b) 14 日 14:00、(c, d) 15 日 08:00 区域平均 ($24.7^{\circ}\text{N}\sim 25.1^{\circ}\text{N}$, $118.1^{\circ}\text{E}\sim 118.4^{\circ}\text{E}$) 位温 (左列) 和水汽混合比 (右列) 垂直廓线

Fig. 12 Simulated mean profiles of potential temperature (left panel) and water vapor mixing ratio (right panel) averaged in the region ($24.7^{\circ}\text{N}\sim 25.1^{\circ}\text{N}$, $118.1^{\circ}\text{E}\sim 118.4^{\circ}\text{E}$) observed from CFSR and simulated by seven different PBL schemes at (a, b) 1400 BT 14 and (c, d) 0800 BT 15 September, 2016

大, 主要表现为水汽随高度递减的速率远小于实况。分别计算了实况和各方案模拟的边界层低层(50~500 m)和中性层(500~1000 m)水汽混合比的递减率, 实况水汽在中性层的递减率远小于边界层低层, 而 QNSE 和 MYJ 方案水汽在中性层的递减率则大于边界层低层, 这与实况相反, 其余方案则与实况趋势一致。从计算的递减率趋势上来看, Boulac 方案和 UW 方案最接近实况, 但就量值而言, UW 方案与实况差异较大; 而 Boulac 方案则与实况最为接近, 且 500 m 以上水汽混合比垂直廓线与实况最为接近, 至 1.9 km 时两者几乎重合。相较其他方案, Boulac 方案能够对不同高度层水汽递减率变化趋势进行更为准确的模拟, 这可能得益于其对稳定层结和不稳定层结下湍流交换进行不同处理有关: 该方案在稳定层结下使用局地 K 理论计算湍流扩散, 即湍流交换仅发生在相邻层次之间, 当大气层结转为不稳定时, 则认为湍流交换发生在地表和边界层各层之间(江丽芳等, 2017)。

QNSE 和 MYJ 两种方案描述的水汽混合比廓线分布在几种方案中最为接近, 并在边界层低层与实况最为接近, 但由于这两种方案下的水汽混合比廓线分布趋势, 也即边界层低层向中性层转换时水汽混合比递减率的变化趋势与实况相反, 因此, 随着高度增加, 其水汽混合比廓线不再是与实况最为接近的廓线, 至 1200 m 时则进一步转变为相距实况最远的廓线。

由 9 月 14 日 14:00 位温廓线分布(图 12a)可见, 实况位温随高度递增, 但递增速率在不同高度略有变化: 250 m 以下递增率略大于 250~450 m 的递增率, 450~700 m 递增率有所加大, 700~1300 m 递增率再次有所下降, 至 1300 m 以上递增率再次加大。各试验虽没有模拟出实况位温廓线随高度递增速率的多次变化过程, 但总体变化趋势是一致的, 即各试验均模拟出了边界层低层位温廓线随高度递增速率先减小后又增大的趋势。同样, 各试验模拟 600 m 以下的边界层低层大气位温与实况的差异在整个边界层是最大的, 比实况普遍偏大 2~3.5 K, 其中 UW 方案偏大程度最甚, 该方案下位温随高度递增速率也最小, 与实况的差异也是最大的(图 12a)。同样的, 在低层, Boulac 方案虽不是最接近实况廓线分布的, 但到 1300 m 以上, Boulac 方案模拟的位温廓线最接近实况。QNSE 和 MYJ 两种方案描述的位温廓线分布在几种方案

中最为接近, 也同样在边界层低层最靠近实况, 但随着高度增加, 不再是最接近实况的廓线, 至 1300 m 时, 开始转变为相距实况最远的廓线, 并且其与实况的差异随高度增加不断加大。

注意到, QNSE 和 MYJ 两种方案描述的位温和水汽混合比廓线分布在几种方案中是最为接近的, 且两者廓线差异较小, 这与不稳定层结下 QNSE 方案采用的是与 MYJ 方案一致的湍流动能闭合方案有关。同时还注意到, 总的来说, 不同方案之间的水汽混合比垂直分布差异与位温垂直分布差异极为相似, 这与 Hu et al. (2010) 的结论一样, 这主要是因为每个边界层方案中使用的湍流水汽交换系数与热量交换系数一致。

对于 14 日 20:00 区域平均的位温和水汽混合比廓线而言, Boulac 方案并未表现出明显优于其他方案的特征, 并且在 1000 m 以上几乎是与实况廓线相差最大的方案, 说明 Boulac 方案对夜间边界层结构的模拟不及日间。15 日 02:00, 实况水汽仍表现为随高度递减的整体趋势, 而 ACM2、YSU 和 GBM 方案则模拟出较明显的逆湿度梯度现象, 这与实况不符(图略), 而 Boulac 方案则较好模拟出 500 m 以下水汽递减率大于 500 m 以上递减率的趋势, 就水汽廓线变化趋势而言与实况最为接近(图略)。

15 日 08:00, 300 m 以下实况位温随高度递增, 300 m 以上递增率略有所减小, 至 500 m 上位温递增率加大明显, Boulac 方案是模拟出该趋势的最优方案, 并在整个边界层均最接近实况, 特别是 500~1800 m 高度 Boulac 方案模拟的位温廓线与实况几乎重合(图 12c)。15 日 08:00, 在 100 m 以下的近地层各方案几乎都模拟出逆湿梯度现象, 即在地表附近水汽混合比随高度有增加的趋势, 这是稳定边界层的典型特征, 但该特征在实况中并未出现(图 12d)。从整个水汽混合比的廓线分布趋势而言, Boulac 方案是比较接近实况的, 但其在 500 m 以下边界层低层水汽明显偏弱。

另外, 注意到, 即使是仅针对一个个例的数值试验, 某种边界层方案在不同时刻模拟的位温和水汽混合比的边界层结构也并非一致最佳或最差, 例如以本节讨论的登陆台风引起的陆地上台风主体降水中心区域平均而言, Boulac 方案在 14 日 14:00 和 15 日 08:00 模拟边界层结构最佳, 但 14 日 20:00 和 15 日 02:00 模拟 1 km 以上的边界层热、

动力结构与实况相差最大; QNSE 和 MYJ 方案模拟 14 日 14:00 和 14 日 20:00 水汽混合比廓线在 500 m 以下与实况最接近, 但在 15 日 02:00 和 15 日 08:00 却是与实况相差最大的。由此也进一步说明边界层过程的复杂性。

5 不同地面层参数化方案数值试验

第 4 节重点讨论了不同边界层参数化方案对模拟台风“莫兰蒂”登陆阶段的影响, 其中 YSU、ACM2、UW、GBM 和 Boulac 试验采用的地面层方案相同, 均为 MM5 相似理论地面层方案, 因此试验结果的差异反映的是这五种边界层方案对台风模拟的影响; 而 MYJ、QNSE 试验使用的地面层方案则分别为 ETA 相似理论方案和准正态尺度消除方案, 它们与其他试验结果的差异反映的是边界层方案和地面层方案的共同影响。那么地面层方案的不同究竟可以给模拟结果带来多大的影响呢? 本节对此进行简要讨论。

表 1 所示七种边界层方案仅 ACM2、UW 和 Boulac 有可供选择的地面层方案, 其中 UW 和

Boulac 可选地面层方案均为 MM5 相似理论方案和 ETA 相似理论方案, ACM2 可选地面层方案为 MM5 相似理论方案和 Pleim-Xiu 方案。以第 3 节所示参数设置对 UW、Boulac 方案开展的选取 ETA 相似理论地面层方案的数值试验, 模式积分过程均很快崩溃; 而对 ACM2 方案开展的选取 Pleim-Xiu 地面层方案的数值试验则模拟成功, 为了与表 1 所示 ACM2 试验相区别, 该试验简称为 ACM2_P 试验。

以 ACM2 试验为对照试验, 图 13 给出了 YSU、UW、GBM、Boulac 和 ACM2_P 试验相对于 ACM2 试验模拟的 9 月 14 日 08:00 至 15 日 08:00 A、B、C 三个暴雨区 24 h 累积降水极值大小差异及其位置差异; 台风中心附近最大风速平均差异、最大风速差异、最小海平面气压差异及其台风中心间距差异的分布, 其中 YSU、UW、GBM 和 Boulac 试验与 ACM2 试验的差异代表不同边界层参数化方案的影响差异, 而 ACM2_P 与 ACM2 试验的差异则代表不同地面层方案的影响差异。由图可见, ACM2_P 试验与 ACM2 试验的差异, 无论

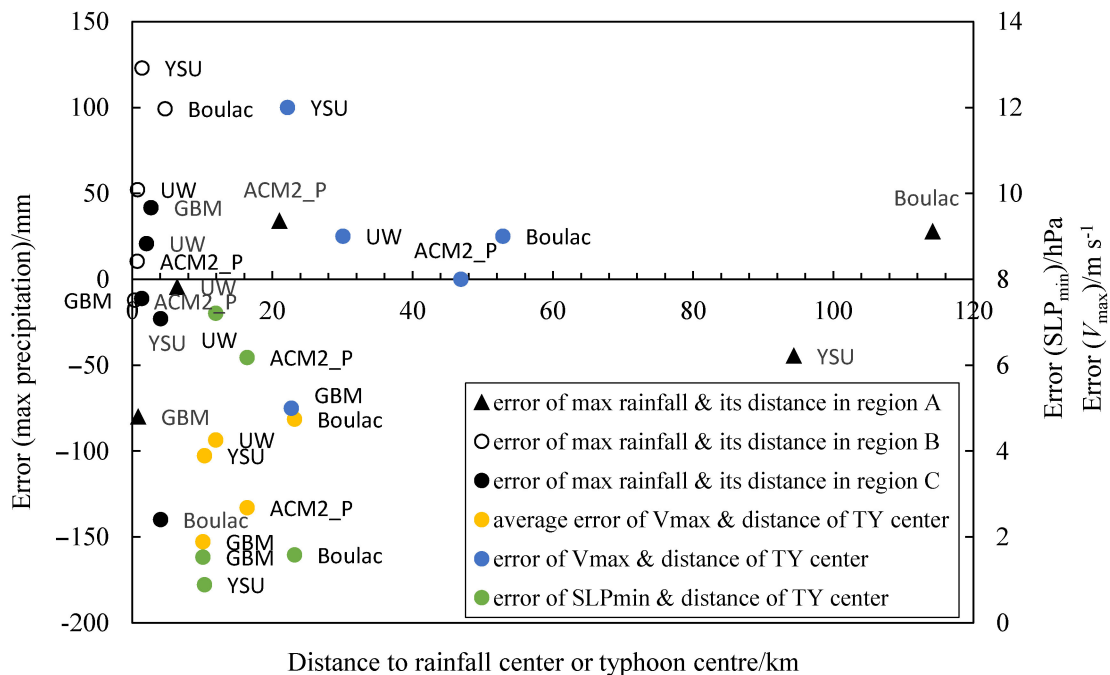


图 13 YSU、UW、GBM、Boulac 和 ACM2_P 试验相对 ACM2 试验模拟的 2016 年 9 月 14 日 08:00 至 15 日 08:00 A、B、C 三个暴雨区 24 h 累积降水量极值大小差异及其位置差异; 台风中心附近平均最大风速差异、最大风速差异、最小海平面气压差异及其台风中心间距差异的分布

Fig. 13 Simulated difference of maximum 24-h accumulated rainfall and its situation, difference of mean maximum wind speed, maximum wind speed near typhoon center, minimum sea level pressure and its distance to typhoon center between YSU, UW, GBM, Boulac, ACM2_P experiments and ACM2 experiment during 0800 BT 14 to 0800 BT 15 September, 2016, respectively

是 A、B、C 三个暴雨区的降水极值大小、位置, 还是最大风速、最小海平面气压、台风中心等差异均介于 YSU、UW、GBM、Boulac 试验与 ACM2 试验差异之间。如在暴雨区 A 区, UW 试验与 ACM2 试验的差异最小, 而 Boulac、YSU 试验与 ACM2 的试验相对差异较大, 而 ACM2_P、GBM 试验与 ACM2 试验的差异则介于其间; 在暴雨区 B 区, ACM2_P 试验的差异仅比 GBM 试验的差异略大; 在暴雨区 C 区, ACM2_P 试验的差异最小。平均最大风速和最大风速均是 ACM2_P 试验的差异仅大于 GBM 试验, 最小海平面气压则是 ACM2_P 试验的差异仅小于 UW 试验, 平均台风中心间距和最大台风中心间距均是 ACM2_P 试验的差异仅小于 Boulac 试验。

以上结果表明, 由不同边界层参数化方案所导致的对降水极值、落区、台风中心附近最大风速的模拟差异比由不同地面层方案所引起的差异普遍要大, 但在海平面气压和台风路径的模拟上则反之, 不同地面层方案的影响明显加大。

进一步考察了上述几个试验模拟的逐时台风路径演变(图 14), 发现 ACM2_P 试验模拟台风路径偏离 ACM2 试验的程度要比 YSU、UW 和 GBM 试验偏离的程度更大, 与 Boulac 试验偏离程度相当。至模拟 24 h 即 15 日 08:00, ACM2 试验与实况路径误差为 78.2 km, 在图 3b 所示的 7 个试

验中误差位列第 4 位, 而 ACM2_P 试验与实况路径的误差已加大至 114.3 km, 比图 3b 所示的误差最大的 QNSE 试验的 101.1 km 还要大。因此, 对台风路径的模拟, 地面层方案的影响也很大, 不容忽视。就本个例而言, 采用 MM5 相似理论地面层方案明显优于 Pleim-Xiu 地面层方案。进一步考察后发现 ACM2_P 试验模拟感、潜热通量比 ACM2 试验大得多, 如模拟 1 h 后, ACM2_P 试验台风主体的感、潜热通量最大值分别为 650 W m^{-2} 和 4400 W m^{-2} , 而 ACM2 试验则小得多, 其值分别为 350 W m^{-2} 和 1700 W m^{-2} , 并且在整个模拟过程, ACM2_P 试验台风主体的感、潜热通量始终远大于 ACM2 试验(图略), 这可能是导致 ACM2_P 试验模拟台风路径显著差于 ACM2 试验的原因。

6 结论与讨论

本文利用中尺度数值模式 WRF v3.8 中的 YSU、MYJ、QNSE、ACM2、UW、GBM、Boulac 七种不同边界层参数化方案, 采用高分辨率(1.33 km)数值试验的方法研究了不同边界层方案对模拟台风“莫兰蒂”(1614)登陆减弱阶段的移动路径、强度、结构、降水量、近地层有关物理量场分布等方面的影响, 并初步探讨了 MM5 相似理论与 Pleim-Xiu 两种不同地面层方案的影响, 结果表明:

(1) “莫兰蒂”台风减弱登陆阶段, 不同边界层方案对台风路径、强度、降水量模拟影响显著, 24 h 内模拟台风路径、最低气压、最大风速及 24 h 累积降水量极值的最大差异分别为 80 km、11 hPa、 27 m s^{-1} 及 241 mm。

(2) Boulac 方案模拟台风路径与实况最为接近, GBM、YSU 和 MYJ 方案分别次之, ACM2 和 UW 方案再次之, 而 QNSE 方案最差。UW 和 QNSE 方案模拟的最低气压以及 MYJ 和 QNSE 方案模拟的最大风速与观测最为接近。不同边界层方案均模拟出“莫兰蒂”台风登陆阶段最低气压逐渐升高以及其升高速率在台风登陆后大于登陆前的特征, 这与实况一致, 但台风登陆前各方案模拟最低气压升高速率均大于实况, 而台风登陆后却又不及实况, 也即各边界层方案能够在一定程度上描述出海洋和陆地下垫面差异所引起的“莫兰蒂”台风在登陆减弱阶段最低气压升高速率在洋面小于陆地的特征, 但对这两种下垫面边界层湍流混合过程及其对大气影响差异的描述还远远不够, 进一步分析发

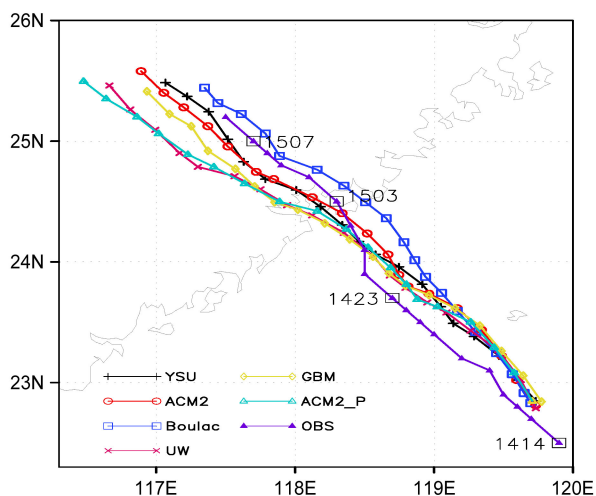


图 14 观测及不同试验模拟的 2016 年 9 月 14 日 14:00 至 15 日 08:00 1 h 间隔的台风移动路径

Fig. 14 Typhoon moving path observed and simulated by different experiments with 1-h intervals from 1400 BT 14 to 0800 BT 15 September 2016

现,这与不同边界层方案计算的台风主体感热通量在海洋和陆地上的差异不够大有关。

(3) 台风主体完全处于洋面(完全登上陆地)阶段,主要受不同边界层参数化方案对海表(地表)边界层过程处理的差异的影响,而在台风移近陆地到主体环流完全登上陆地阶段,台风边界层海洋和陆地下垫面兼而有之。与受单一海洋(陆地)下垫面条件影响相比,当台风主体受海、陆两种下垫面共同影响时,不同边界层参数化方案对台风路径的影响更大。也即,不同边界层方案对登陆阶段台风的影响较其对发展期台风及完全登上陆地的台风的影响更大。

(4) 不同边界层方案试验均模拟出了福建境内台风主体降水及其外围螺旋雨带降水,模拟差异主要体现在各量级降水北边界、强降水落区与极值上。总体而言, Boulac 方案模拟的 24 h 降水分布、强降水落区、结构、强度和各量级降水 TS 评分均最优, MYJ 方案次之;而 QNSE、UW 和 ACM2 方案雨带向西北方向推进过快,各量级降水 TS 评分均较差。

(5) 综合“莫兰蒂”台风登陆减弱阶段台风路径、强度和降水模拟, Boulac 和 MYJ 方案(均采用局地湍流动能闭合方案)相对最优,其中 Boulac 方案在台风路径和降水模拟上更优,而 MYJ 方案在台风强度模拟上更优;YSU 和 GBM 方案次之,而 QNSE、UW 和 ACM2 方案相对较差。这与不同边界层参数化方案计算的台风登陆减弱阶段近地层潜热通量、感热通量显著不同有关。比较而言, QNSE 方案潜热通量相对异常偏高,这导致模式产生了虚假的降水现象,降水量模拟明显偏强;MYJ 和 Boulac 方案量值适中,其余方案相对略小。各边界层方案模拟台风中心附近最大风速与感热通量最大值的演变具有高度正相关性,各方案均达到 0.001 显著性水平,进一步分析发现 QNSE 方案感热通量相对略偏高,MYJ 方案适中,其他方案则相对显著偏小。

(6) 从位温和水汽混合比的廓线来看,不同边界层方案模拟降水区边界层结构差异明显,能否合理描述从边界层低层向中性层转换时位温(水汽混合比)随高度递增(递减)的速率的变化趋势对模拟边界层结构至关重要,其中 Boulac 方案模拟的边界层低层向中性层转换时位温(水汽混合比)递增(递减)率的变化趋势与实况最为接近,因此

该方案对边界层结构的模拟具有明显优势,尤其是对日间边界层结构的模拟。

(7) 不同地面层方案对降水强度和落区、台风中心附近最大风速、最小海平面气压和台风路径的模拟差异较大,尤其是对台风路径的模拟,地面层方案的影响不容忽视,就本个例而言, MM5 相似理论地面层方案明显优于 Pleim-Xiu 地面层方案;此外,由不同边界层参数化方案所导致的模拟降水强度、落区、台风中心附近最大风速的差异比由不同地面层方案引起的差异普遍要大,但在海平面气压和台风路径的模拟上则反之,不同地面层方案的影响明显加大。

台风主体在由受海洋下垫面影响向受海、陆下垫面共同影响转换的过程中,不同边界层方案试验均不同程度存在感热通量在持续减弱阶段突然增强、同时伴随模拟最大风速在持续减弱过程中突然加大的现象,这与实况不符。由此推断,在台风主体环流靠近陆地,开始转受海洋和陆地下垫面共同作用影响时,这七种边界层方案对海、陆感热通量的计算,及其两者相互作用影响的考虑均存在不足。

本文所得结论基于一个台风个例得出,所得结论还不具有普遍性,加之边界层过程影响的复杂性,今后有必要对更多台风开展边界层参数化方案的影响研究;另外,本文重点关注的是“莫兰蒂”台风登陆阶段,并且台风处于持续减弱过程,如果台风处于其他发展阶段,如初生阶段、发展阶段或快速增强阶段,是否会有不同结论,也值得进一步深入探究。

参考文献 (References)

- Bougeault P, Lacarrere P. 1989. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117(8): 1872–1890. doi:10.1175/1520-0493(1989)117<1872:POOITI>2.0.CO;2
- Bretherton C S, Park S. 2009. A new moist turbulence parameterization in the community atmosphere model [J]. *J. Climate*, 22(12): 3422–3448. doi:10.1175/2008JCLI2556.1
- Bryan G H, Wyngaard J C, Fritsch J M. 2003. Resolution requirements for the simulation of deep moist convection [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131(10): 2394–2416. doi:10.1175/1520-0493(2003)131<2394:rftso>2.0.co;2
- 陈炯, 王建捷. 2006. 边界层参数化方案对降水预报的影响 [J]. *应用气象学报*, 17(S1): 11–17. Chen Jiong, Wang Jianjie. 2006. Mesoscale precipitation simulation sensitivity to PBL parameterization [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in*

- Chinese), 17(S1): 11–17. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.z1.002
- 陈亦君. 2014. WRF 边界层参数化对城市气象要素预报的敏感性分析 [D]. 华东师范大学硕士学位论文. Chen Yijun. 2014. Sensitivity analysis of WRF PBL parameterizations' impact on urban meteorological elements forecasting [D]. M. S. thesis (in Chinese), East China Normal University.
- 陈杨瑞雪, 罗亚丽. 2016. 不同边界层参数化方案和陆面过程参数化方案对一次梅雨锋暴雨显式对流模拟的影响分析 [J]. *热带气象学报*, 32(5): 656–667. Chen Yangruixue, Luo Yali. 2016. Analysis of the influence of different parameterization schemes representing the planetary boundary layer and land surface processes on convection-permitting simulations of a heavy rainfall event along Mei-Yu front [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 32(5): 656–667. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2016.05.008
- 崔驰满, 包云轩, 袁成松, 等. 2018. 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*, 42(6): 1344–1362. Cui Chixiao, Bao Yunxuan, Yuan Chengson, et al. 2018. Influence of different boundary layer parameterization schemes on the simulation of an advection fog process in Jiangsu [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(6): 1344–1362. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17212
- Davis C, Bosart L F. 2002. Numerical simulations of the genesis of Hurricane Diana (1984). Part II: Sensitivity of track and intensity prediction [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130(5): 1100–1124. doi:10.1175/1520-0493(2002)130<1100:NSOTGO>2.0.co;2
- 邓国, 周玉淑, 李建通. 2005. 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*, 29(3): 417–428. Deng Guo, Zhou Yushu, Li Jiantong. 2005. 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 (in Chinese)*, 29(3): 417–428. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.03.09
- 丁成慧, 李江南, 赵杨洁, 等. 2018. 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*, 34(5): 657–673. Ding Chenghui, Li Jiangnan, Zhao Yangjie, et al. 2018. The influence of boundary layer parameterization schemes on autumn typhoon Sarika (2016) in South China Sea [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 34(5): 657–673. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2018.05.008
- Grell G A, Freitas S R. 2014. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 14(10): 5233–5250. doi:10.5194/acp-14-5233-2014
- Grenier H, Bretherton C S. 2001. A moist PBL parameterization for large-scale models and its application to subtropical cloud-topped marine boundary layers [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129(3): 357–377. doi:10.1175/1520-0493(2001)129<0357:AMPPFL>2.0.CO;2
- Hill K A, Lackmann G M. 2009. Analysis of idealized tropical cyclone simulations using the weather research and forecasting model: Sensitivity to turbulence parameterization and grid spacing [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137(2): 745–765. doi:10.1175/2008MWR2220.1
- Hong S Y, Pan H L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124(10): 2322–2339. doi:10.1175/1520-0493(1996)124<2322:NBLVDI>2.0.CO;2
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134(9): 2318–2341. doi:10.1175/MWR3199.1
- Hu X M, Nielsen-Gammon J W, Zhang F Q. 2010. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(9): 1831–1844. doi:10.1175/2010JAMC2432.1
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 113(D13): D13103. doi:10.1029/2008JD009944
- Janjic Z I. 1994. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122(5): 927–945. doi:10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2
- Janjic Z I. 2001. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 scheme in the NCEP MESO model [R]. NCEP Office Note, No. 437, 61pp.
- 江丽芳, 尹毅, 刘春霞. 2017. 边界层参数化方案对台风“莫拉菲”热力 and 动力结构特征影响的对比 [J]. *海洋预报*, 34(4): 20–31. Jiang Lifang, Yin Yi, Liu Chunxia. 2017. Comparison of the thermal and dynamic boundary layer structure with different boundary layer parameterizations during typhoon “Molave” [J]. *Marine Forecasts (in Chinese)*, 34(4): 20–31. doi:10.11737/j.issn.1003-0239.2017.04.003
- 赖文峰, 刘阳, 麦健华, 等. 2010. 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*, 32(6): 10–14. Lai Wenfeng, Liu Yang, Mai Jianhua, et al. 2010. Numerical sensitivity experiments with different boundary layer schemes for typhoon Molave [J]. *Guangdong Meteorology (in Chinese)*, 32(6): 10–14. doi:10.3969/j.issn.1007-6190.2010.06.003
- Li X L, Pu Z X. 2008. Sensitivity of numerical simulation of early rapid intensification of Hurricane Emily (2005) to cloud microphysical and planetary boundary layer parameterizations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136(12): 4819–4838. doi:10.1175/2008MWR2366.1
- 刘羽, 陈超君, 许建玉. 2015. 中尺度模式边界层方案对华中区域降水预报的对比试验 [J]. *暴雨灾害*, 34(3): 230–238. Liu Yu, Chen Chaojun, Xu Jianyu. 2015. Comparison of precipitation forecast in central China with different boundary layer parameterizations [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 34(3): 230–238. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2015.03.005
- Mellor G L, Yamada T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. *Rev. Geophys.*, 20(4): 851–875. doi:10.1029/rg020i004p00851
- Nolan D S, Zhang J A, Stern D P. 2009a. 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 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137(11): 3651–3674.

- doi:10.1175/2009MWR2785.1
- Nolan D S, Stern D P, Zhang J A. 2009b. 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]. *Mon. Wea. Rev.*, 137(11): 3675–3698. doi:10.1175/2009MWR2786.1
- 庞琦烨, 平凡, 沈新勇, 等. 2019. 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*, 43(1): 202–220. Pang Qiye, Ping Fan, Shen Xinyong, et al. 2019. A comparative study of effects of different microphysics schemes on precipitation simulation for typhoon Mujigae (2015) [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(1): 202–220. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17291
- Pleim J E. 2007. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: Model description and testing [J]. *Appl. Meteor. Climatol.*, 46(9): 1383–1395. doi:10.1175/JAM2539.1
- Pleim J E, Chang J S. 1992. A non-local closure model for vertical mixing in the convective boundary layer [J]. *Atmos. Environ. Part A. Gen. Top.*, 26(6): 965–981. doi:10.1016/0960-1686(92)90028-J
- Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Stull R B. 1991. 边界层气象学导论 [M]. 扬长新, 译. 北京: 气象出版社, 2pp. Stull R B. 1991. An Introduction to Boundary Layer Meteorology (in Chinese) [M]. Yang Changxin, trans. Beijing: China Meteorological Press, 2pp.
- Sukoriansky S, Galperin B, Perov V. 2005. Application of a new spectral theory of stably stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 117(2): 231–257. doi:10.1007/s10546-004-6848-4
- 孙敏. 2012. 参数化及资料同化对台风 Morakot 数值模拟的影响 [D]. 南京大学硕士学位论文. Sun Min. 2012. Impact of physical parameterization schemes and data assimilation on the numerical simulation of typhoon Morakot [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University.
- 孙文奇, 李昌义. 2018. 数值模式中的大气边界层参数化方案综述 [J]. *海洋气象学报*, 38(3): 11–19. Sun Wenqi, Li Changyi. 2018. A review of atmospheric boundary layer parameterization schemes in numerical models [J]. *Journal of Marine Meteorology (in Chinese)*, 38(3): 11–19. doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.03.002
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136(12): 5095–5115. doi:10.1175/2008MWR2387.1
- 王晨稀. 2013. 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*, 28(2): 197–208. Wang Chenxi. 2013. Experiments of influence of planetary boundary layer parameterization on Muifa typhoon prediction [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 28(2): 197–208. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2013.02.0197
- 王颖, 张镭, 胡菊, 等. 2010. WRF 模式对山谷城市边界层模拟能力的检验及地面气象特征分析 [J]. *高原气象*, 29(6): 1397–1407. Wang Ying, Zhang Lei, Hu Ju, et al. 2010. Verification of WRF simulation capacity on PBL characteristic and analysis of surface meteorological characteristic over complex terrain [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29(6): 1397–1407.
- 王叶红, 赵玉春, 罗昌荣, 等. 2019. 双雷达风场反演拼图在登陆台风“莫兰蒂”(1614)强降水精细预报中的同化应用试验 [J]. *气象学报*, 77(4): 617–644. Wang Yehong, Zhao Yuchun, Luo Changrong, et al. 2019. Assimilation experiments for the application of dual-radar retrieval wind mosaics in detailed heavy precipitation forecast produced by landfall typhoon “Meranti” (1614) [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 77(4): 617–644. doi:10.11676/qxxb2019.041
- 王雨星, 钟中, 孙源, 等. 2017. 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*, 60(7): 2545–2555. Wang Yuxing, Zhong Zhong, Sun Yuan, et al. 2017. The mechanism analysis of the track deviation of tropical cyclone Megi (2010) simulated with two planetary boundary layer schemes [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 60(7): 2545–2555. doi:10.6038/cjg20170704
- 温晓培, 隆霄, 张述文, 等. 2016. 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*, 32(3): 346–357. Wen Xiaopei, Long Xiao, Zhang Shuwen, et al. 2016. Parameterization schemes on typhoon Sanba during its initial phase [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 32(3): 346–357. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2016.03.006
- 徐慧燕, 朱业, 刘瑞, 等. 2013. 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*, 37(1): 149–159. Xu Huiyan, Zhu Ye, Liu Rui, et al. 2013. Simulation experiments with different planetary boundary layer schemes in the lower reaches of the Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(1): 149–159. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12021
- 徐亚钦, 翟国庆, 李国平, 等. 2017. 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*, 33(2): 201–211. Xu Yaqin, Zhai Guoqing, Li Guoping, et al. 2017. Optimization test for microphysical and boundary layer parameterization of high-impact Zhejiang typhoons by WRF model [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 33(2): 201–211. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2017.02.006
- Zhang D L, Zhang W Z. 2004. Diurnal cycles of surface winds and temperatures as simulated by five boundary layer parameterizations [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43(1): 157–169. doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0157:dcoswa>2.0.co;2
- 张建海, 张立波, 庞盛荣. 2007. 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*, 26(1): 26–35. Zhang Jianhai, Zhang Libo, Pang Shengrong. 2007. Sensitive experiments on the boundary layer schemes during the strengthening process of typhoon Khanun [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait (in Chinese)*, 26(1): 26–35. doi:10.3969/j.issn.1000-8160.2007.01.004
- 赵鸣. 2006. 大气边界层动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 20–25. Zhao Ming. 2006. Dynamics of Atmospheric Boundary Layer (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press, 20–25.
- 赵玉春, 王叶红, 陈健康, 等. 2018. “莫兰蒂”台风 (2016) 登陆前后精细结构及其引发福建特大暴雨的模拟研究 [J]. *暴雨灾害*, 37(2):

- 135–148. Zhao Yuchun, Wang Yehong, Chen Jiankang, et al. 2018. Numerical investigation on detailed structure of typhoon “Meranti” (2016) and extreme heavy rainfall event induced by it before and after landfall in Fujian [J]. [Torrential Rain and Disasters \(in Chinese\)](#), 37(2): 135–148. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.02.005
- 赵玉春, 王叶红. 2019. 台湾岛地形对登陆台风“莫兰蒂”(1614)强对流雨带发展影响的模拟研究 [J]. [大气科学](#), 43(1): 27–48.
- Zhao Yuchun, Wang Yehong. 2019. A numerical study of Taiwan island impacts on the development of the intensive convective rain-band of landfalling typhoon “Meranti” (1614) [J]. [Chinese Journal of Atmospheric Sciences \(in Chinese\)](#), 43(1): 27–48. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17217
- 周昊, 朱伟军, 彭世球. 2013. 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](#), 29(5): 803–812.
- Zhou Hao, Zhu Weijun, Peng Shiqiu. 2013. 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 \(in Chinese\)](#), 29(5): 803–812. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.05.010