

边界层参数化方案对台风“莫拉菲”热力和动力结构特征影响的对比

江丽芳¹, 尹毅^{2,3}, 刘春霞⁴

(1.国家海洋局南海预报中心,广东 广州 510310; 2.中国科学院大学,北京 100049; 3.中国科学院南海海洋研究所,广东 广州 510301; 4.中国气象局广州热带海洋气象研究所,广东 广州 510080)

摘 要: 评估WRF模式对南海台风期间边界层的模拟能力,并对比分析了6组边界层参数化方案模拟的边界层热力和动力结构。与风温湿廓线探空资料的对比表明:边界层参数化对于位势高度和温度的模拟影响较小;BouLac参数化方案模拟的结果与实况变化趋势最接近,MYNN和YSU方案模拟的结果次之。是否考虑边界层参数化对热带气旋路径和强度的模拟影响显著;采用不同边界层参数化方案对热带气旋结构的模拟存在显著差别,且这种差异不限于边界层。和非局地参数化方案相对比,Boulac方案模拟的效果比较强,这可能是因为该方案有较高的混合效应、较大的对流动能以及能更好的模拟湿对流引起的湿度。BouLac方案模拟的结果更接近实际观测,这表明在稳定层结下使用局地k理论计算湍流扩散更为合理,但非局地方案在风速和气压的预报上存在一定优势。

关键词: 南海;热带气旋边界层;数值模拟;探空资料

中图分类号: P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2017)04-0020-12

1 引言

边界层是热带气旋的重要组成结构之一,研究边界层的结构有利于进一步了解热带气旋低层的通量分布、能量传输和垂直运动发展等规律。在强风条件下观测资料获取非常困难,目前海上低层观测资料稀少,加上遥感资料短缺,至今都难以获取可靠的热带气旋天气期间边界层信息^[1]。目前国内外研究学者已经开展了一些边界层方面的研究,主要集中在数值模式中不同边界层参数化方案的对比分析。Braun等^[2]利用MM5(National Center for Atmospheric Research/Penn State Mesoscale Model Version 5)模式分析了4组边界层参数化方案下的海平面最低气压和最大风速的差异。邓国等^[3]发现3组边界层参数化方案对台风结构、强度等方面有

显著影响,不同边界层参数化方案模拟的台风结构的差异导致台风强度的差异。王晨稀^[4]基于GRAPES-TCM(Global Regional Assimilation and Prediction System-Tropical Cyclone Model)模式,分析了2组边界层参数化方案对台风预报的影响。赖文锋等^[5]利用WRF(Weather Research and Forecasting)模式,对比了3组边界层方案对台风登陆前后的路径、强度和累积降水的影响。黄文彦^[6]利用WRF模式,对比分析了5组不同边界层参数化方案模拟的美国北部森林地区边界层热力和动力结构。Que等^[7]探讨了WRF模式中2组边界层方案对中国大陆、东印度洋和西太平洋这一特大区域的降水和温度的影响。陈俊文等^[8]选用WRF模式对南海冬季海面大风天气进行48 h预报,对模式中多种边界层参数化方案的预报效果进行评估,从而寻找

收稿日期:2016-11-04;修回日期:2017-01-19。

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC1401407);国家自然科学基金项目(41306014)。

作者简介:江丽芳(1983-),女,工程师,博士,从事海气相互作用及大气海浪数值模拟。E-mail: lifangjiang@scsio.ac.cn

通讯作者:尹毅(1978-),男,工程师,博士,从事物理海洋动力学研究。E-mail: yinyi@scsio.ac.cn

出适合南海冬季海面大风预报的方案。以上研究普遍需要用到一些实测如探空资料等,这些资料的稀缺在很大程度上限制了对边界层试验结果的评估研究。总的来说,目前全面评估WRF模式中不同边界层参数化方案对南海热带气旋期间的边界层热力和动力结构特征影响的工作开展较少。已开展的研究大都集中在台风路径、强度或降水等方面,本文将利用WRF模式,全面对比分析5组边界层参数化方案及首次探讨不考虑边界层参数化方案模拟的通量、边界层热力和动力结构,并结合历史探空资料,探讨对南海边界层结构有较好模拟能力的边界层参数化方案。

2 模式设定和资料

WRF模式是以美国大气研究中心、美国海洋大气局预报系统实验室、环境预报中心和俄克拉荷马州大学为主,与其它大学的科学家共同研制和发展的中尺度预报和资料同化模式系统^[9]。模式垂直方向分为40层,顶层高度为100 hPa,水平方向采用Arakawa C网格,模拟范围为93°—147°E,6°S—38°N,模拟中采用双向两重嵌套,网格格距分别为15 km和5 km,地形采用NCAR (National Center for Atmospheric Research)提供的10'×10'资料。模式物理方案包括NCEP (National Center for Environmental Prediction) 3阶简单冰方案、RRTM (Rapid Radiative Transfer Model)长波辐射方案、Duhia短波辐射方案、热力混合陆面方案、BMJ (Betts-Miller-Janjic)云参数化方案、Moni-obkhv近地层方案。利用美国国家环境预报中心的最终全球业务分析数据作为WRF模式的初始场,该数据时间分辨率为6 h一次,空间分辨率为1°×1°;采用中国气象局热带气旋资料中心的实测资料(Typhoon of China Meteorological Administration, CMA)检验台风路径和强度的模拟情况;边界层探空观测资料来源于中国气象局广州热带海洋气象研究所,该资料主要是通过GPS探空仪、探空数据接收机、探空基测箱等仪器获取了各层的高度、气温、相对湿度、风速等^[10],观测地点为香港,观测时间从2009年7月14日00时—2009年7月21日12时(北京时,下同)。

3 边界层方案介绍

本次研究共使用了WRF模式中五种不同边界层方案,分别是非局地YSU (Yonsei University)^[11]、MRF (Medium Range Forecast)、ACM2 (Asymmetric Convective Model Version 2)^[12]、MYNN (Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 2.5)、BouLac (Bougeault-lacarrere)方案。其中MRF方案^[13]基于Troen-Mahrt针对充分混合边界层中的反梯度和K廓线理论的描述在MRF模式中所实现,采用非局地大气边界层垂直扩散方案,使用一个隐式方案实现更大的时间步长;YSU边界层方案^[11]是由MRF方案发展而来的,相对于MRF边界层增加了处理边界层顶部夹卷层的方法,反梯度非局地输送,使用K廓线方法确定扩散系数,显式表示卷夹过程;ACM2方案^[12]采用一个非局地向混合和局地向混合的非对称对流模型,考虑非局地涡流扩散对混合的影响,使用k廓线方法确定扩散系数;MYNN 2.5层^[14]方案采用2.5层湍流动能方案,重新设计了一个新的时间差分算法以克服湍流动能方程中的计算不稳定问题;BouLac方案^[15]在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。

4 与实测结果对比分析

4.1 热带气旋“莫拉菲”概况

本文选取2009年热带气旋“莫拉菲”(Molave)作为边界层敏感性试验个例(见图1a)。2009年7月15日09时,在菲律宾以东海域形成热带低压,16日20时升级为热带风暴。17日晚受副高影响,“莫拉菲”的移动速度稍稍减速,慢慢转向偏西路径前进。18日“莫拉菲”以西北偏西方向逼近珠江口。19日凌晨热带气旋“莫拉菲”在深圳南澳附近一带登陆,于19日05时减弱为强热带风暴,08时“莫拉菲”减弱为热带风暴,14时进一步减弱为热带低压,19日20时减弱为低压区,横过广东渐渐消散。WRF模拟试验中,模式积分时间为2009年7月16

日00时—19日18时。

4.2 与台风年鉴资料的对比分析

图1a为6组试验模拟的热带气旋路径和中国台风年鉴资料的对比图。从模拟结果与实况资料对比看,模拟路径与实况的移动方向较一致。对比结果表明:5组考虑边界层参数化方案模拟的路径差别不大,其中BouLac方案和YSU方案模拟的路径整体较好,MYNN方案模拟的结果次之。在热带气旋前期,模拟路径与实况较为吻合;在模拟后期模拟误差较大,其中模拟误差较大的ACM2方案,其登陆时的误差在150 km以内。不考虑边界层参数化方案对热带气旋路径的模拟影响很大,模拟的路径偏差最大;模式有较强地模拟热带气旋路径的能力,但是模拟路径和台风年鉴的路径之间还是存在一些误差,主要表现在两个方面:一是在模拟的后期,由于模拟时效的延长,大部份试验模拟的路径较实际路径偏南;二是模拟的移动速度较实测速度偏小,“莫拉菲”于19日00时已经登陆,而相应时刻

模拟的热带气旋中心还在南海近岸。

图1b和1c分别为WRF模拟的热带气旋中心的海平面最低气压和附近最大风速与中国气象局(China Meteorological Administration, CMA))台风年鉴的资料对比图。从总的变化趋势看,除不考虑边界层参数化的试验外,其它5组试验模拟的热带气旋强度在18日12时前是一个逐渐加强的过程,随后热带气旋强度逐渐减弱,实际上热带气旋强度也表现出相同的特征。其中YSU和BouLac方案模拟的热带气旋强度和实测最接近,但最大风速和海面气压从18日18时开始与实况误差开始变大。BouLac方案模拟的海平面最低气压和最大风速与年鉴资料对比最接近,相关系数分别达0.90和0.87(见表1)。所有的参数化方案模拟的结果和实况资料对比,结果大体都是中心气压偏高,最大风速偏小,整体强度偏弱,其主要原因可能是模式初始场的空间分辨率较低,没有采用Bogus技术或同化技术调整模式起算时的热带气旋中心经纬度、气压和强度等^[16-18]。

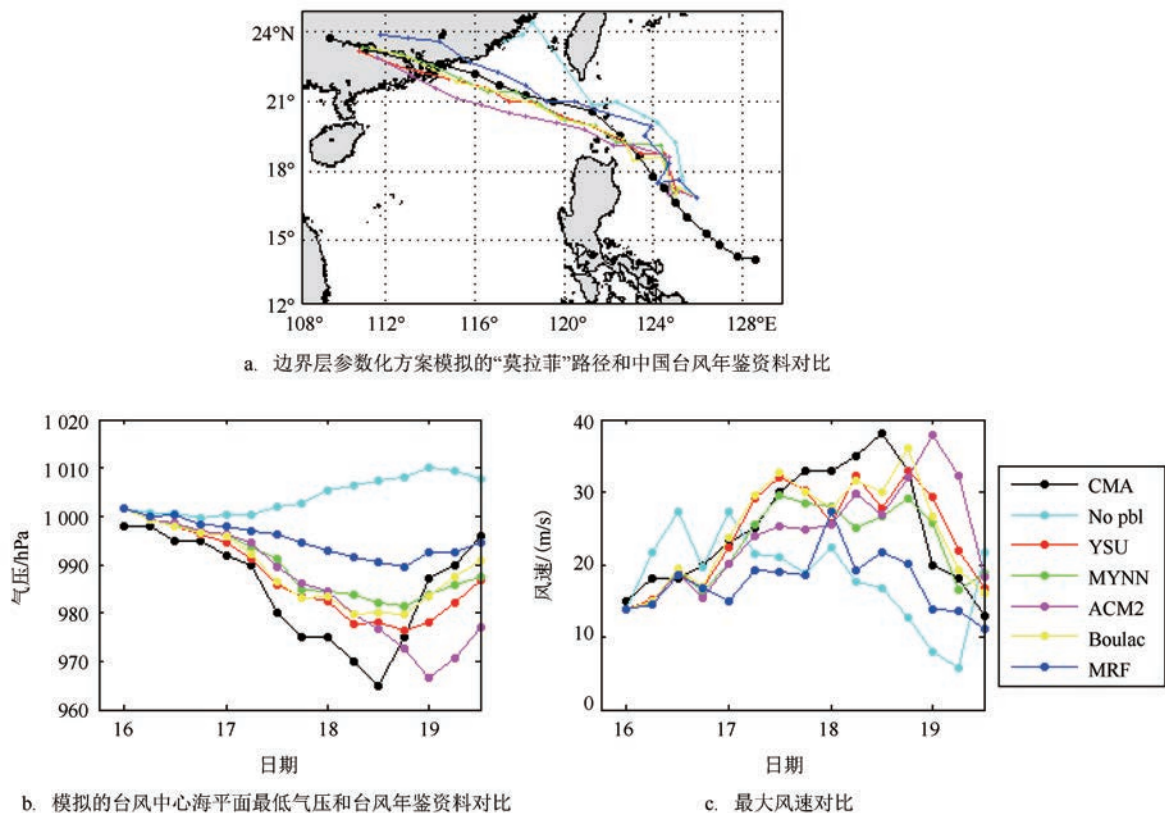


图1 实测与模拟路径、气压及风速对比图

表1 “莫拉菲”中心的海平面最低气压、最大风速与台风年鉴资料对比统计结果

| 模拟方案 | 海平面最低气压/hPa | | | 最大风速/(m/s) | | |
|--------|-------------|-------|------|------------|-------|------|
| | 偏差 | 标准差 | 相关系数 | 偏差 | 标准差 | 相关系数 |
| No pbl | -18.48 | 22.35 | 0.45 | 6.32 | 11.53 | 0.02 |
| YSU | -2.01 | 6.24 | 0.82 | 0.44 | 4.54 | 0.81 |
| MYNN | -4.25 | 7.94 | 0.81 | 2.13 | 4.98 | 0.82 |
| ACM2 | -0.56 | 10.34 | 0.57 | 0.79 | 7.43 | 0.47 |
| Boulac | -3.24 | 6.13 | 0.9 | 0.24 | 3.71 | 0.87 |
| MRF | -9.75 | 12.67 | 0.79 | 7.12 | 8.89 | 0.81 |

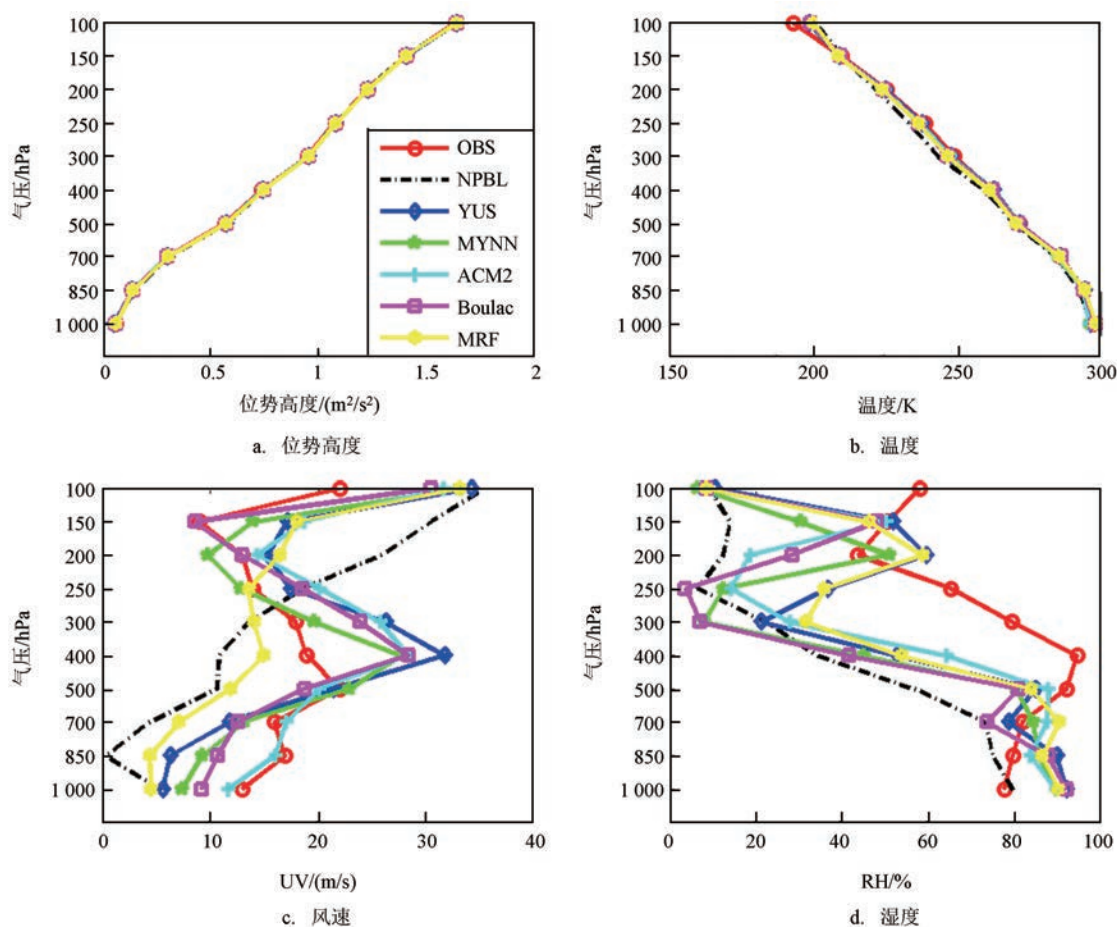


图2 18日12时“莫拉菲”的模拟结果与探空资料(OBS)对比

4.3 与探空资料的对比分析

本文结合探空资料进一步探讨边界层参数化方案在南海模拟热带气旋边界层的适用性。从图2和表2可以看出,6组试验模拟的位势高度、温度和实测对比较一致,相关系数接近1,因此可认为不同边界层参数化方案对位势高度和温度的模拟影响

很小。16日00时—17日12时及19日00时,不同边界层参数化方案模拟的湿度与实测吻合较好,相关系数普遍大于0.80,而18日00时,18日12时及19日12时,各组参数化方案模拟的湿度与实测相差较大,相关系数普遍低于0.75。BouLac方案模拟的湿度与实测的变化趋势最接近。16日00时—17日12时,不同参数化方案模拟的风速与实测吻合较好,

相关系数普遍大于0.70,而18日00时,12时及19日12时,不考虑边界层方案模拟的风速和实测相关性低于0.25。16日00时至19日12时的8个时刻,5组考虑边界层参数化方案模拟的风速和实测之间的相关性都相差不大,其中BouLac边界层参数化方案模拟的风速和实测之间的相关系数最高,为0.86。

5 不同边界层方案模拟的通量分析比较

由于敏感性试验中除边界层方案不同外,其它

各物理项的参数化方案均相同,因此可认为这6组试验模拟结果的差异主要是由边界层过程的不同引起的。

5.1 潜热通量

潜热和感热通量的传输是边界层中的主要物理过程之一^[19],潜热通量对热带气旋的发展、加强和维持有促进作用。从图3可以看出,6组敏感试验模拟的潜热通量数值在海洋均为正值。5组考虑边界层参数化方案的模拟中,潜热通量沿着“莫拉菲”中

表2 18日12时探空资料和模拟值的统计结果

| 模拟方案 | 位势高度/(m ² /s ²) | | | 温度/K | | | 风速/(m/s) | | | 湿度/% | | |
|--------|--|------|------|-------|------|------|----------|-------|-------|-------|-------|------|
| | 偏差 | 标准差 | 相关系数 | 偏差 | 标准差 | 相关系数 | 偏差 | 标准差 | 相关系数 | 偏差 | 标准差 | 相关系数 |
| No-pbl | -43.6 | 65.3 | 1 | 1.51 | 4.05 | 0.99 | -0.05 | 12.53 | -0.24 | 36.75 | 40.15 | 0.71 |
| YSU | -26.4 | 30.2 | 1 | -0.27 | 1.85 | 1 | -3.42 | 6.03 | 0.68 | 16.58 | 28.56 | 0.62 |
| MYNN | -29.7 | 33.6 | 1 | -0.03 | 2.03 | 1 | -1.37 | 3.67 | 0.79 | 25.43 | 36.75 | 0.57 |
| ACM2 | -25.3 | 28.3 | 1 | -0.01 | 2.09 | 1 | -4.59 | 4.41 | 0.72 | 27.32 | 38.28 | 0.6 |
| Boulac | -29.5 | 33.2 | 1 | -0.05 | 2.23 | 1 | -1.21 | 3.2 | 0.86 | 20.53 | 29.02 | 0.81 |
| MRF | -33.4 | 39.4 | 1 | 0.23 | 2.65 | 1 | 1.65 | 4.87 | 0.72 | 15.47 | 28.17 | 0.69 |

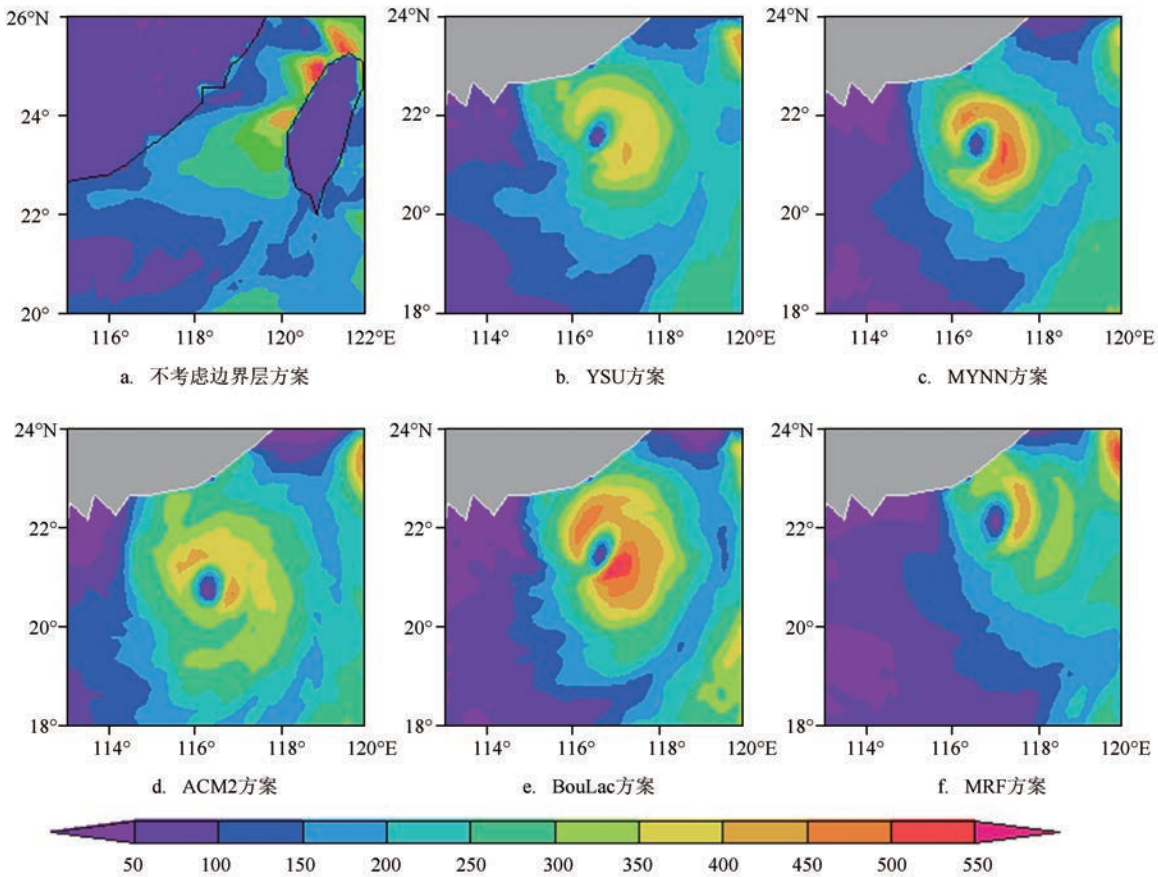


图3 18日12时潜热通量分布图(单位:W/m²)

心呈非对称气旋式分布,高值中心主要分布在“莫拉菲”中心右下侧。热带气旋中心为潜热通量的低值区,潜热通量由中心向外逐渐增强,一般在最大风速区的潜热通量达到最大值。其中BouLac方案模拟的潜热通量最大值高达 580 W/m^2 ,MYNN方案次之,约为 450 W/m^2 ,YSU方案最小,约为 330 W/m^2 。不考虑边界层方案的试验中,潜热通量的气旋式分布特征不显著,其空间分布和其它5组参数化方案的敏感性试验完全不一致。潜热通量的大小和热带气旋强弱成正相关,潜热输送越大,热带气旋强度越强,反之,潜热输送越小,热带气旋强度越弱。

5.2 感热通量

感热通量的空间分布特征与潜热通量的分布特征基本相似(见图4)。热带气旋区域附近为感热通量的正值区,其高值中心普遍位于“莫拉菲”中心的东南侧,热带气旋外区的感热通量逐渐变小。与潜热通量分布的不同之处在于感热通量在数值上比潜热通量小很多,如MYNN和BouLac方案中热带气旋中心附近的最大值不到 100 W/m^2 ,ACM2方案次之,热带气旋中心附近最大感热通量为 80 W/m^2 左右,不考虑边界层方案模拟的感热通量最小,仅为 10 W/m^2 。由此可见虽然感热通量对热带气旋强度有一定影响,但是其影响相对比潜热通量要小得多。

5.3 水汽通量

边界层中水汽通量的供应对热带气旋发生、发展和加强过程也具有非常重要的影响,水汽通量的辐合上升释放出来的大量凝结潜热可为热带气旋的发展和加强提供能量。6组试验的水汽通量和潜热通量的空间分布(见图3)除了量值的大小差异,基本一致(图略),其中考虑边界层参数化的5组试验模拟的水汽通量的空间分布形式相似,其空间分布形态具有显著的涡旋不对称性分布特征,“莫拉菲”中心的水汽通量最小,最大风速区中的水汽通量最大;在“莫拉菲”前进方向右下方的水汽辐合较强,热带气旋前进方向左前方的水汽辐合较弱,这说明水汽通量的辐合主要产生在“莫拉菲”经过后的一段时间里。“莫拉菲”中心的水汽通量明显小于四周,这是因为上升气流出现在台风眼区四周的

云墙区和降水带,而下沉气流出现在台风的眼区。比较6组试验的水汽通量可知,BouLac方案模拟的水汽通量最强,最高值为 $2.1 \times 10^{-4} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$,MYNN次之,为 $1.9 \times 10^{-4} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$,不考虑边界层方案试验模拟的水汽输送最弱,不足于维持台风的发展和加强,因此该时刻热带气旋强度较弱,水汽通量也没有显著的气旋结构分布。

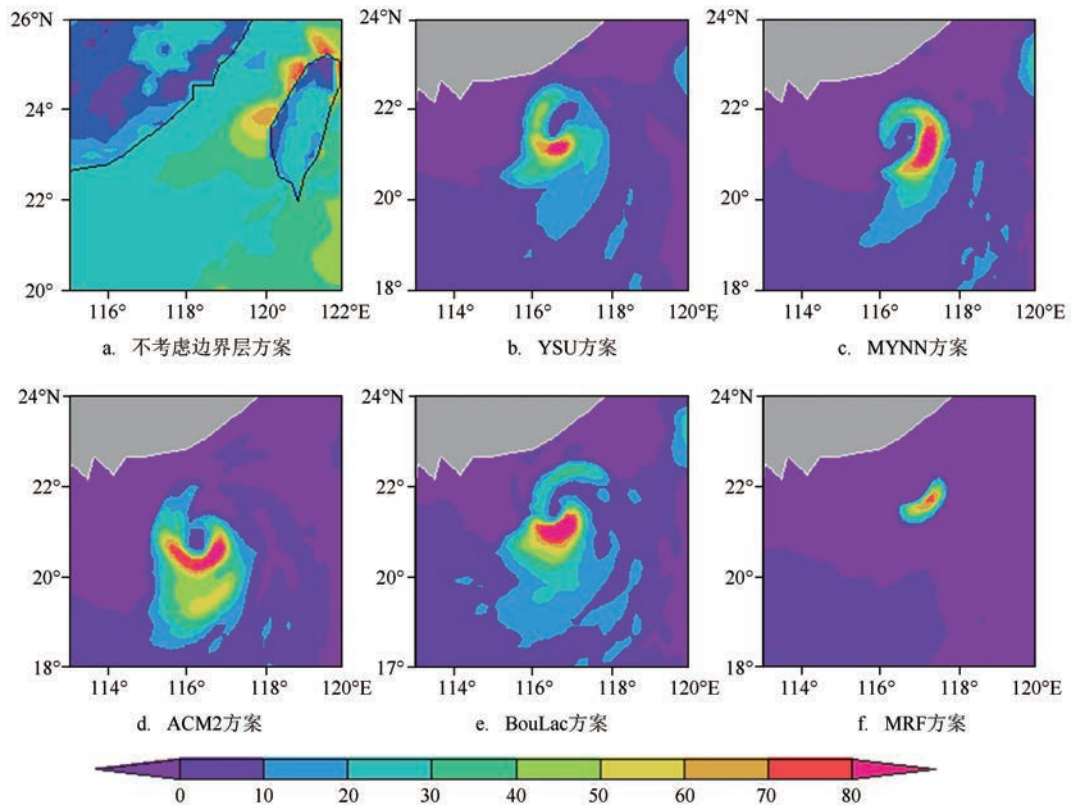
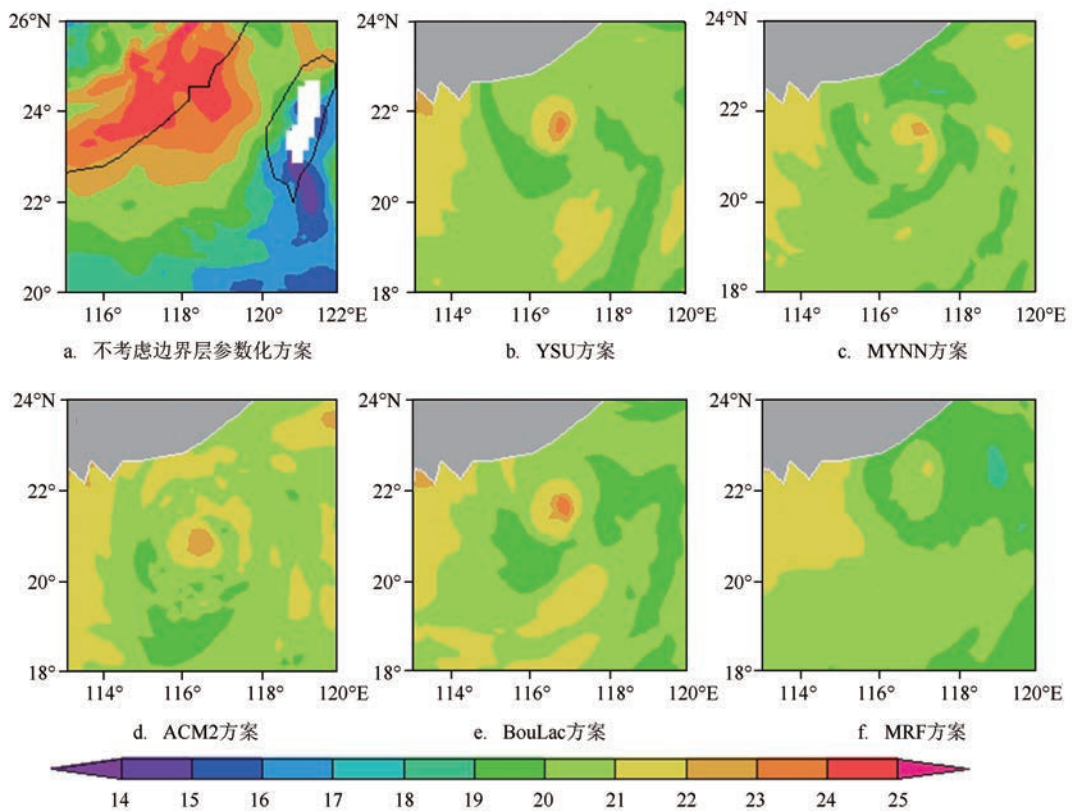
6 边界层参数化模拟的热力场和动力场的差异

边界层通过海气通量影响着“莫拉菲”的强度,而其强度的变化与其热力场和动力场密切相关,下文将对比分析6组试验的热力场和动力场。

6.1 热力场的差异

潜热通量的大量释放,是热带气旋暖心结构形成的重要因素^[20]。从850 hPa温度场(见图5)来看,除了不考虑边界层方案的试验外,其它5组试验模拟的温度场的空间分布较为一致,即“莫拉菲”中心是温度的高值中心。自台风中心向外,“莫拉菲”中心切线方向上的等温线构成的闭合中心呈气旋式分布形态^[3,21-22]。YSU和BouLac方案模拟的热带气旋中心温度最高,均为 24°C ;MYNN方案次之,为 22°C ;850 hPa温度的空间分布与潜热通量的强弱分布较为一致,这说明热带气旋的低层受海气界面通量的影响比较显著。另外在不考虑边界层方案的模拟中,海面上温度呈现气旋式分布,其中心是一个高温区,最高温度超为 24°C ,该研究结果表明,不考虑边界层参数化方案中,低层的温度可以传输到850 hPa,但是没有较强的潜热通量和感热通量以及水汽通量的输送,热带气旋失去了维持和发展的能量来源,因此该方案模拟的热带气旋非常弱。

图6a—f分别是“莫拉菲”18日12时经过“莫拉菲”中心的東西向断面的水汽通量空间分布图。图6b—f组模拟的水汽通量空间分布形态相似,均具有不对称性特征;“莫拉菲”低层的水汽通量较大,随着高度的升高,水汽通量不断减小,中心左侧的水汽通量值普遍较大。其中5组考虑边界层方案模拟的水汽通量极大值均达到100%在400 hPa以下的极大值均在90%左右,其中ACM2和BouLac方案

图4 18日12时感热通量分布图(单位: W/m^2)图5 18日12时850 hPa温度等值线图(单位: $^{\circ}\text{C}$)

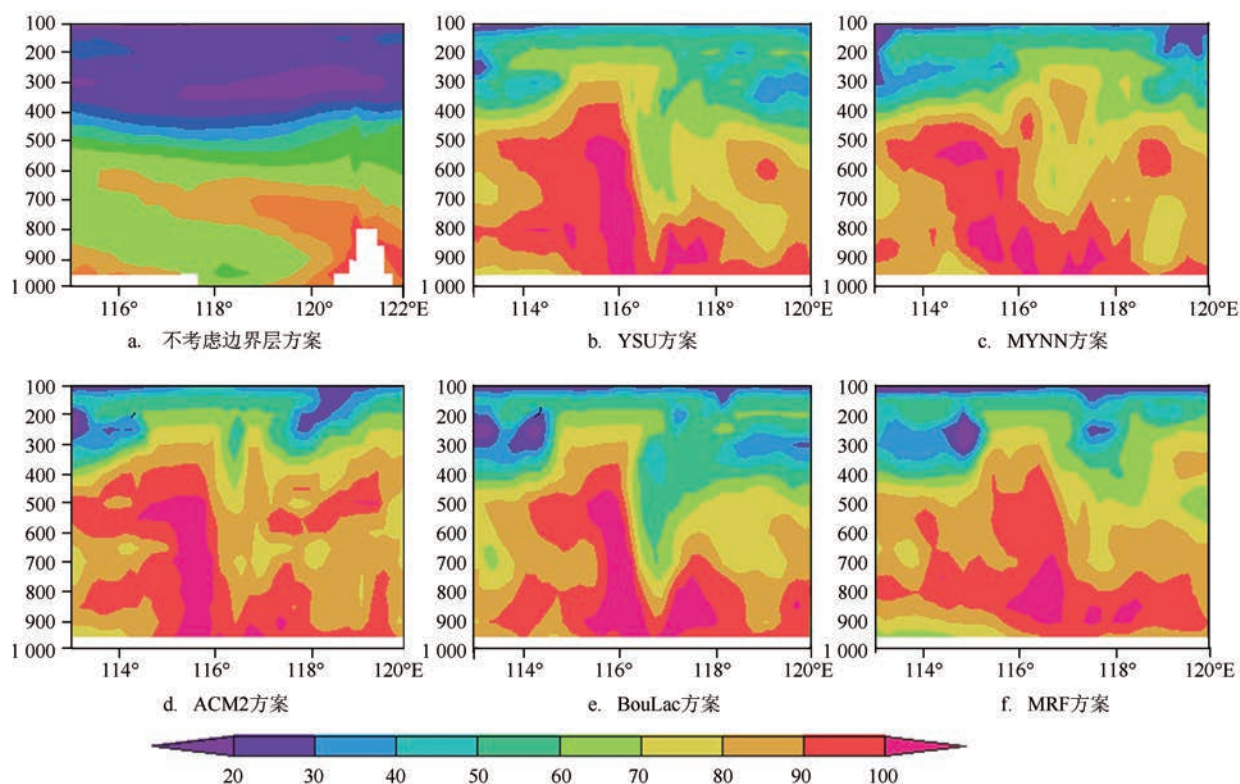
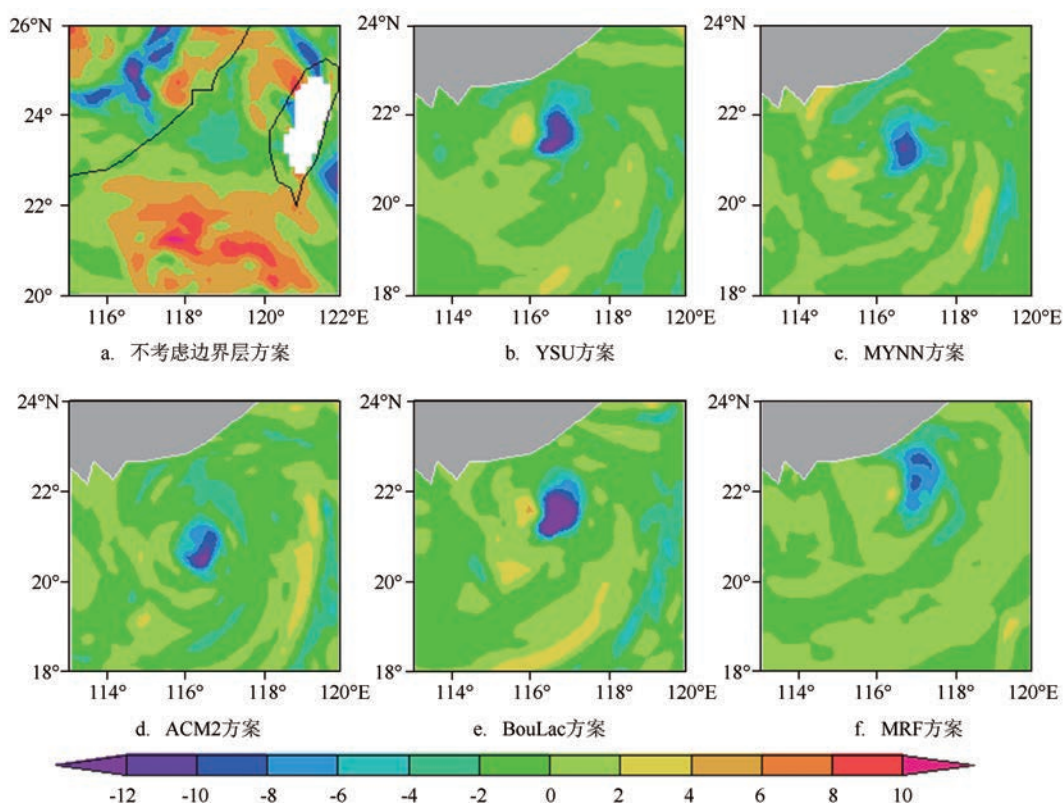


图6 18日12时垂直湿度等值线分布图(单位:%)

图7 18日12时相对涡度(200 hPa 和 850 hPa 涡度差,单位: $10^{-4}/s$)

模拟的水汽通量整体较强。而不考虑边界层方案模拟的水汽通量极大值不超过 90%, 400 hPa 以上的湿度几乎小于 20%, 底层的水汽输送到约 600 hPa 就输送不上去, 说明不考虑边界层参数化时, 热带气旋强度也就无法维持。

6.2 动力场的差异

相对涡度在一定程度上可作为热带气旋强度的评判因子^[22]。热带气旋环流低层的相对涡度一般为正值, 高层为负值。当高层和低层相对涡度的差值小于零时, 则说明该时刻的热带气旋正在维持或发展中。相对涡度差越小, 表明热带气旋结构就越完整, 强度越强。图 7b—f 组中热带气旋中心相对涡度差的低值区都在 $-12 \times 10^{-4}/s$ 以下, 表明“莫拉菲”具有足够的能量来维持其较强的垂向梯度运动。虽然 5 组考虑边界层参数化方案模拟的“莫拉菲”相对涡度差的负值区域的范围基本一致, 但低值中心位置存在显著差异。其中 BouLac 方案涡度差极低值达 $-14 \times 10^{-4}/s$, YSU 方案模拟的涡度差的极低值次之, 达 $-13 \times 10^{-4}/s$, 而不考虑边界层试验中的相对涡度普遍为正值, 说明该区域没有明显的气流辐合抬升。

散度的强弱可以反映了大气中高、低层的辐散和辐合强弱, 也反映可表征出边界层中的天气现象的剧烈程度^[23]。图 8 为 18 日 12 时 6 组试验的 200 hPa 与 850 hPa 之间的散度差空间分布。与相应的 200 hPa 与 850 hPa 之间的涡度差最小值出现在“莫拉菲”中心不同, 散度正值区位于“莫拉菲”眼壁附近, 呈气旋式不对称式的空间分布形态, 该现象既表明“莫拉菲”的眼壁区存在强烈的辐合上升气流, 又反映了热带气旋系统的气旋式结构分布特征。由于“莫拉菲”西侧偏北的气流部分经过陆地, 而东侧偏南的气流主要来自海洋, 后者气流携带的水汽较前者多, 导致靠近陆地的热带气旋西侧的散度较小。从涡度和散度差的空间分布分析, 不同方案下散度差的分布与相对涡度差的分布刚好相反, 即散度越大, 相对涡度差越小。其中 YSU 和 MRF 方案模拟的散度较 BouLac 方案的结果偏强, 热带气旋中心散度差值最大值超过 $6 \times 10^{-4}/s$, 说明这两个方案下的热带气旋高层辐散和低层辐合比其它方案显著。不考虑边界层方案中的涡度差和散度差

值都很小, 说明该方案模拟的热带气旋低层辐合和高层辐合辐散都不显著, 热带气旋结构不完整, 热带气旋强度也较小。

从沿热带气旋中心东西向断面的水平风场垂直剖面图来看(见图 9), “莫拉菲”的风场呈显著的不对称结构分布, 内部气流以上升运动为主, 低层为气旋式流入气流, 气旋式流入气流在垂直方向上一直延续到对流层顶部, 高层为反气旋式流出气流。不考虑边界层方案模拟的热带气旋风速强度远小于其它 5 组模拟结果, 低层没有显著的气旋式气流流入, 低层风速最大风速不超过 15 m/s, 而高层也没有反气旋式气流流出。5 组考虑边界层参数化方案模拟的低层风速极大值区域均分布在“莫拉菲”低层的风场受到陆地地形影响, 在热带气旋和陆地之间产生了较强的气流, 形成类似于狭管效应的现象^[3]。BouLac、YSU 和 ACM2 方案模拟低层的风速极大值较大, 最大风速达 32 m/s, 中高层以 Acm2 方案为大, 在 600 hPa 到 500 hPa 之间, 最大风速达 30 m/s 左右, 而 MRF 方案在所有层面上风速均是最低的, 但是相差不明显, 大概每个层面相差 3 m/s。

7 结论

利用 WRF 模式较全面的评估该模式对南海台风期间边界层的模拟能力, 并对比分析了边界层参数化方案模拟的边界层热力和动力结构, 得到如下主要结论:

(1) 与热带气旋附近的风温湿廓线探空资料的对比表明: 行星边界层参数化对于位势高度和温度的模拟没有很大影响; BouLac 参数化方案模拟的热带气旋结果与实况变化趋势最接近, 而且热带气旋中心最低海平面气压、热带气旋中心附近最大风速与中国台风年鉴中的对应要素的相关系数也最高;

(2) 是否考虑边界层参数化对热带气旋路径和强度的模拟影响显著; 不考虑边界层参数化, 热带气旋低层的热量、水汽和动量通量均难以向高层输送, 而采用不同的边界层参数化方案对热带气旋结构的模拟存在显著差别, 且这种差异不限于边界层;

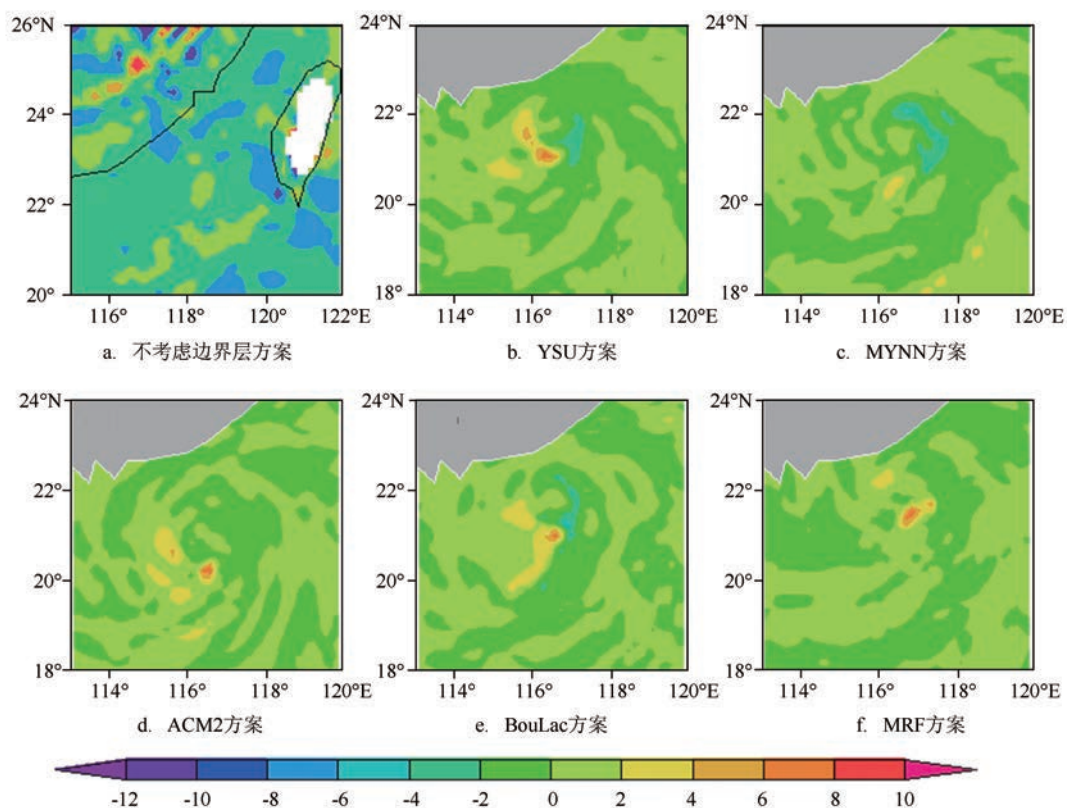
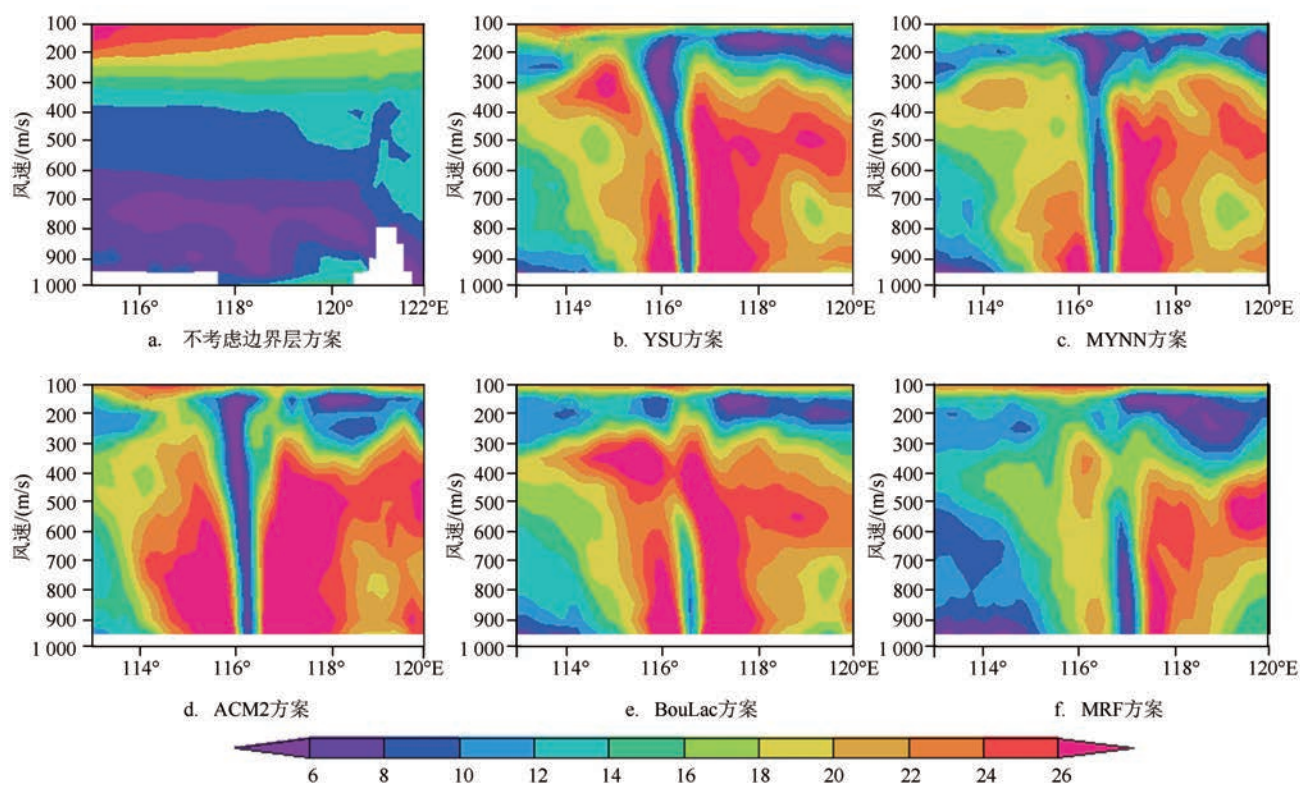
图8 18日12时散度(200 hPa和850 hPa散度差,单位: $10^{-4}/s$)

图9 18日12时水平风速的垂直分布

(3) BouLac 方案模拟的潜热通量、感热通量以及水汽通量最高,这和该方案模拟的台风强度最强相对应;BouLac 和 MRF 方案模拟的散度较 YSU 方案的结果偏强,说明这两个方案下的热带气旋高层辐散和低层辐合比其它方案显著。和非局地参数化方案相对比,Boulac 方案模拟的效果比较强,是因为有较高的混合效应、较大的对流动能以及能更好的模拟湿对流引起的湿度。

BouLac 方案模拟的结果更接近实际观测,这表明在稳定层结下使用局地 k 理论计算湍流扩散更为合理,但非局地方案在风速和气压的预报上存在一定优势。

致谢:非常感谢中国气象局广州热带海洋气象研究所提供的探空资料。

参考文献:

- [1] 李响,王辉,吴辉碇,等.海上大气边界层数值预报技术发展概论[J].海洋预报,2010,27(1): 72-82.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 黄文彦,沈新勇,王卫国,等.边界层参数化方案对边界层热力和动力结构特征影响的比较[J]. 地球物理学报, 2014, 57(5): 1399-1414.
- [7] Que L J, Que W L, Feng J M. Intercomparison of different physics schemes in the WRF model over the Asian summer monsoon region[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2016, 9(3): 169-177.
- [8] 陈俊文,蔡扬,白毅平,等.南海冬季一次海面大风天气的 WRF 模式预报检验[J]. 海洋预报, 2014, 31(4): 32-40.
- [9] Michalakes J, Dudhia J, Gill D O, et al. The weather research and forecast model: software architecture and performance[C]//11th Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology. UK: European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 2004: 1-13.
- [10] 廖菲,邓华,赵中阔,等.热带气旋科学观测试验及研究进展概况[J]. 热带气象学报, 2013, 29(4): 687-697.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Hong S Y, Pan H L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model[J]. Monthly Weather Review, 1996, 124(10): 2322-2339.
- [14] 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.
- [15] Bougeault P. A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection[J]. Monthly Weather Review, 1985, 113(12): 2108-2121.
- [16] 李江南,龚志鹏,王安宇,等.南海台风 Vongfong(2002)的数值模拟试验[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(3): 85-89.
- [17] 钮学新,杜惠良,刘建勇. 0216 号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验[J]. 气象学报, 2005, 63(1): 57-68.
- [18] 张建海,诸晓明,王丽华. 台风 Haitang 和 Matsa 引发浙江暴雨强度和分布的对比分析[J]. 热带气象学报, 2007, 23(2): 126-134.
- [19] Charney J G, Eliassen A. On the growth of the hurricane depression[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1964, 21(1): 68-75.
- [20] Wang B, Elsberry R L, Wang Y Q, et al. Dynamics in tropical cyclone motion: A review[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1998, 22(4): 535-547.
- [21] Hawkins H F, Imbembo S M. Structure of a small, intense hurricane—Inez 1966[J]. Monthly Weather Review, 1976, 104(4): 418-442.
- [22] 陈联寿,徐祥德,罗哲贤,等.热带气旋动力学引论[M]. 北京:气象出版社, 2002: 217-228.
- [23] 丁一汇. 高等天气学[M]. 2 版. 北京:气象出版社, 2005: 276-289.

Comparison of the thermal and dynamic boundary layer structure with different boundary layer parameterizations during typhoon “Molave”

JIANG Li-fang¹, YIN Yi^{2,3}, LIU Chun-xia⁴

(1. South China Sea Marine Forecast Center of State Oceanic Administration, Guangzhou 510310 China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 China; 3. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301 China; 4. Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080 China)

Abstract: Base on the mesoscale WRF mode, the performance of simulating the structural feature of the boundary layer in the South China Sea is evaluated and the thermal and dynamic structural feature in the boundary layer under 6 kinds of boundary layer parameterizations scheme are compared and analyzed. Compared with the sounding data, the results show that the simulation of geopotential height and temperature is not greatly affected with the different PBL scheme. The simulation with the BouLac scheme is closest to the observed data. The MYNN scheme and YSU scheme produce weaker result than that of the BouLac scheme. The PBL schemes on the simulation of tropical cyclone track and intensity have a significant different to the result without PBL schemes. The simulations of structure of tropical cyclone are significantly difference with different PBL schemes; the difference is not limited in PBL.

Key words: South China Sea; the boundary layer of tropical cyclone; simulation; sounding data