

doi: 10.3969/j.issn.1007-6190.2010.06.003

台风“莫拉菲”对不同边界层方案的敏感性数值模拟

赖文锋, 刘阳, 麦建华, 林文实

(中山大学环境科学与工程学院, 广东广州 510275)

摘要: 利用 WRF 中尺度模式, 在不同边界层方案下对 2009 年第 6 号台风“莫拉菲”登陆前后的主要过程进行了数值模拟, 分析了边界层参数化方案对台风的大环境场、路径、强度和累积降水的影响。并通过对边界层过程中的感热通量和潜热通量进行分析, 表明台风强度和累积降水主要是由水汽凝结潜热释放造成的。MRF 方案为非局地 K 理论方案, YSU 方案是新一代的 MRF 方案, 增加了显式处理的夹卷层过程, 而 MYJ 方案是 Mellor-Yamada 2.5 级湍流闭合方案, 主要是使用 TKE 闭合方法。模拟结果表明, YSU 方案比 MRF 方案在模拟结果中有明显的改善, MYJ 方案出现在模拟台风强度过强的情况。综合来说, YSU 方案的模拟结果较好。

关键词: 大气科学; 边界层; 台风; 莫拉菲; WRF 模式

中图分类号: P42

文献标识码: B

文章编号: 1007-6190(2010)06-0010-05

行星边界层是指最靠近下垫面的对流层底层, 它受到地面的直接影响, 其中包括地面的摩擦作用及水分、热量的传输过程。这层大气受地面热力和动力影响, 并对地面强迫以 1 h 左右的时间尺度进行响应。边界层中主要的物理过程包括动量输送、热量输送、水汽输送、摩擦效应、污染物排放以及地形强迫等。边界层运动以湍流交换为主要特点, 并且垂直方向的混合远强于水平方向的混合, 混合的方式有局地混合和非局地混合两种; 在边界层顶部, 边界层和自由大气之间通过通量和夹卷等方式有物质和能量的交换。因此边界层过程对地面和大气之间进行动量、热量和水汽的交换起着十分重要的作用。

台风边界层是台风结构的重要组成部分, 通过揭示台风边界层的结构可进一步了解台风低层的通量分布、能量传输以及垂直运动发展规律。但是, 由于海洋上探测技术的限制导致观测资料的欠缺, 获得高分辨率的海洋观测资料十分困难, 人们至今仍难以获得台风条件下边界层的可靠信息。目前尽管对台风的运动、结构、强度等方面展开了大量的研究, 但是对于热带气旋边界层的结构、作用也还不十分清楚^[1-2]。因此, 台风边界层的研究是十分必要和重要的。

本研究通过使用新一代非静力平衡、高分辨率的中尺度数值模式 WRF 对 2009 年第 6 号台风“莫拉菲”进行 2 km 的高水平分辨率数值模拟实验, 通过对 WRF 中 3 种常用的边界层方案进行试验, 分别为 MRF 方案、YSU 方案和 MYJ 方案, 试图找出不同边界层方案的对台风的影响。

1 台风“莫拉菲”的天气过程

2009 年第 6 号台风“莫拉菲”于 7 月 16 日 06 00(本

文所用的时间均为世界时)在菲律宾东部洋面形成热带风暴并向西北偏北方向移动, 17 日 06 00 加强为强热带风暴; 17 日 12 00 路径发生明显偏转, 折向西北偏西方向移动并横过巴林塘海峡进入中国南海; 进入南海后, “莫拉菲”进一步加强, 17 日 18 00 加强为台风仍按照西北偏西方向行进, 中心附近最大风速 33 m/s, 中心最低气压 975 hPa。最终于 18 日 16 50 在广东深圳市大鹏半岛(南澳镇)沿海地区登陆, 登陆时中心附近最大风力 13 级(38 m/s), 中心最低气压 965 hPa。“莫拉菲”登陆后, 仍向西北偏西方向移动, 但强度逐渐减弱, 在深圳市境内减弱为强热带风暴, 随后“莫拉菲”继续西行进入广西境内减弱为热带低压, 最终在云南境内消散。

2 模式试验方案设置

本研究所使用的数值模式为美国国家大气研究中心(NCAR)、国家大气海洋局的预报系统实验室、国家大气环境研究中心(FSL, NCEP/NOAA)和俄克拉荷马大学的暴雨分析预报中心等多单位联合发展起来的新一代非静力平衡、高分辨率的中尺度数值模式, 简称 WRF(Weather Research and Forecast)。该模式主要考虑从云尺度到天气尺度等重要天气的预报, 水平分辨率重点考虑 1~10 km。本研究所用的版本为 2008 年 4 月发布的 ARW V3 版本。ARW 采用可压缩非静力欧拉方程组, 垂直坐标采用地形追随质量坐标, 模式顶气压取为常数, 水平网格采用 Arakawa-C 网格, 更适合于进行高分辨率的模拟, 采用 3 阶 Runge-Kutta 时间分裂积分方案。模式的物理方案、边界条件、嵌套方案及投影方式有多种选择。

模拟试验选取 MERCATOR 地图投影的 3 重网格嵌套区域(图 1), 按照区域由大到小分别用 D01、D02、D03

收稿日期: 2010-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40775066)

作者简介: 赖文锋(1986 年生)男, 硕士生, 主要从事中小尺度数值模拟工作。

表述这 3 个区域。其中 D01 区域是网格距为 18 km 粗网格区域, 格点数为 240×205 用于模拟大尺度的环境条件, 区域中心为 $119.0^\circ \text{E } 19.0^\circ \text{N}$ 范围是 $(1.57^\circ \text{N} \sim 34.79^\circ \text{N } 98.15^\circ \text{E} \sim 139.85^\circ \text{E})$; 中网格区域 D02 格点数为 298×199 格距为 6 km 区域中心为 $115.32^\circ \text{E } 20.98^\circ \text{N}$ 用于反映台风中尺度系统的变化。细网格区域 D03 格点数为 466×301 格距为 2 km 区域中心为 $115.50^\circ \text{E } 21.85^\circ \text{N}$ 用于反映台风小尺度结构和微物理过程。垂直方向分为不等距的 28 个 e_{a} 层。试验在 D01 和 D02 采取 Betts-Miller-Janjic 对流参数化方案, D03 不采用对流参数化方案。云微物理方案为 WSM6 含霰复杂云微物理方案。长波辐射方案使用 RRIM 方案, 短波辐射方案使用 Dudhia 方案。利用 4 次/d 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP/NCAR 全球格点再分析 FNL 资料作为模式的第一猜测场, 在模式的第一个时刻使用了 Bogus^[3] 人造涡旋, 最终形成初始场。D01 和 D02 的模拟时间从 2009 年 7 月 18 日 00:00 ~ 19 日 12:00 共积分 36 h, D03 所模拟的时段从 18 日 00:00 ~ 19 日 00:00 共积分 24 h。

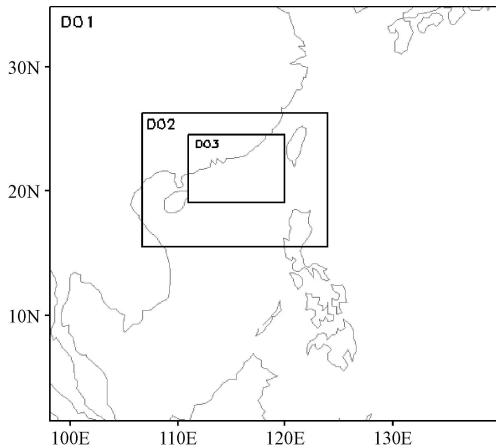


图 1 模拟试验区域设置, D01、D02 和 D03 区域范围

本研究设计了 3 个试验方案, 分别对应 3 种不同的边界层, 分别是 MRF、YSU 和 MYJ 方案^[4], 其他设置相同。

MRF 参数化方案主要是在不稳定状态下计算反梯度热量通量和水汽通量, 在行星边界层中使用增强的垂直通量系数, 行星边界层高度由临近理查逊数决定。利用隐式局地方案处理垂直扩散项, 并且在自由大气中以局地理查逊数为根据。

YSU 方案是新一代的 MRF 方案, 表面层与 MRF 方案一样采用 Monin-Obukhov 相似理论。与 MRF 的主要区别是增加了显式处理的夹卷层过程。边界层高度用整体理查逊数表达, 并考虑了温度的影响。湍流输送廓线中考虑了反梯度输送项。在风温廓线中考虑了逆温层中夹卷作用造成的热量交换; 提出了速度尺度廓线和 Prandtl 数廓线; 考虑了动量的非局地混合; 并将改进后的结果与大涡模拟得到的数据作了比较, 发现它更接近于实际的边界层特征。

MYJ 方案的行星边界层和自由大气中的湍流参数化

都是使用 Mellor-Yamada 2.5 级湍流闭合模式的非奇异方案。这是一种基于 1.5 阶湍流闭合的边界层参数化方案, 也称 TKE 闭合。在边界层内部, 以湍流动能作为预报量, 对所有的湍流阶量进行诊断, 从而达到闭合边界层内动量方程的目的。同时, 经验常数也作了修正。MYJ 湍流动能闭合方案考虑相对复杂, 计算量较大, 但是适合于研究精细的边界层结构。

3 不同边界层方案模拟结果比较

3.1 “莫拉菲”的大尺度环境场

许多研究表明, 在影响热带气旋的诸多因素中, 大尺度环境场作为台风发生发展外部条件, 它的模拟优劣将直接影响到其内部的中尺度台风发生和演变的情况。大尺度环境场对台风的路径、强度变化、结构、风雨分布也有影响。因此, 对环境场的成功模拟是成功模拟台风演变过程的基础。

图 2 给出水平分辨率为 18 km 的粗网格区域 D01 在 7 月 18 日 21:00 天气实况进行对比。从图 2 中可以看到, 3 个模拟试验的环境场和实况的天气图总体形势十分相似, 台风中心位置和海平面气压与实况比较接近。台风 18 日 16:50 在广东深圳市大鹏半岛 (南澳镇) 沿海地区登陆。此时 3 个模拟试验的环境场还是比较相似, 与实况也比较一致。地面风速出现 MYJ 方案的风速最大, YSU 方案次之, MRF 方案最小的情况。

3.2 边界层参数化方案对台风路径的敏感性

本研究有关台风“莫拉菲”路径的结果均来自网格 D02 区域 (水平分辨率为 6 km)。路径模拟时间从 2009 年 7 月 18 日 00:00 到 2009 年 7 月 19 日 12:00 共 36 h 时间间隔为 6 h。模拟的台风路径由每个时次的最低海平面气压的位置决定。

从模拟结果 (图 3) 来看, 在台风登陆前, 3 个方案与实况路径比较相似, 误差在 40 km 范围内, MYJ 方案和 YSU 方案模拟结果比较好, MRF 方案偏差较大些。在台风登陆后, 3 个方案的台风路径出现较大的差异, 这可能是因为台风登陆后, 受到近地面边界层的影响比较大, 所以不同的边界层方案在台风路径上的模拟差异比较大。从模拟结果来看, YSU 方案的模拟路径最为接近实况路径, MYJ 方案路径模拟结果次之, MRF 方案的路径模拟偏差最大。从台风的登陆位置和登陆时间来看, YSU 方案的登陆位置和登陆时间与实况比较一致, 而 MYJ 与 MRF 方案的登陆位置偏大, 登陆时间也比实况提前。

在台风路径偏差 (图 4) 方面, 在 18 日 12:00 之前, MRF 与 YSU 方案的路径偏差表现出比较大的差异, YSU 方案的路径偏差最小, MYJ 方案次之, MRF 方案的路径偏差最大。其中 MRF 方案的最大路径偏差高达 140 km。

从台风路径和台风路径的偏差来看, YSU 方案对台风路径模拟最好, 路径偏差最小, 其次为 MYJ 方案, 在台风没有登陆之前, 台风路径和路径的偏差都模拟得比较好, 但在登陆后, 模拟结果较 YSU 方案差, MRF 方案对台风路径模拟最差, 路径偏差最大。

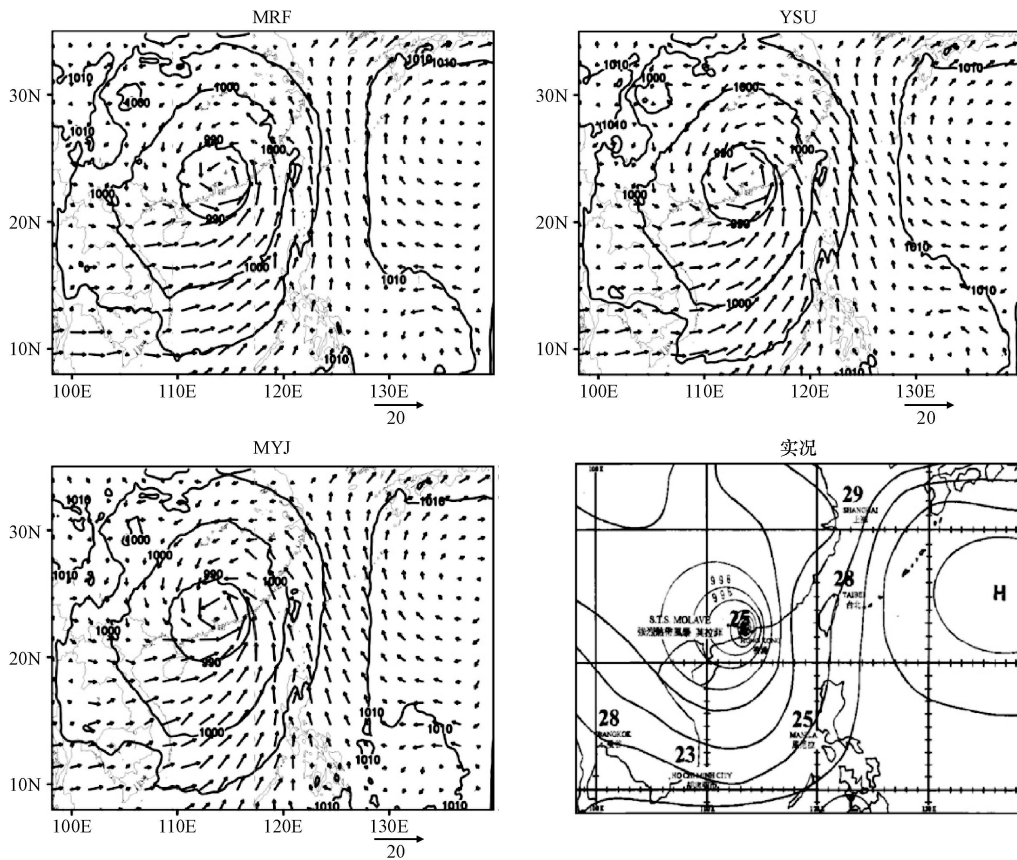
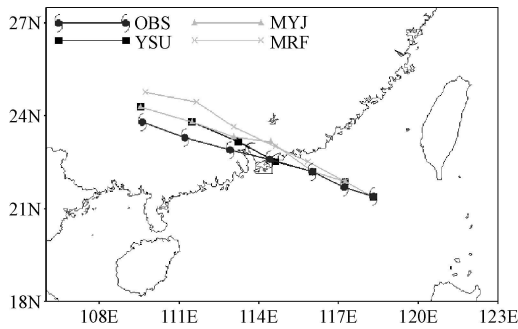


图 2 18 日 21 00 三个模拟试验和实况的环境场 (实况地面天气资料来自于香港天文台的地面天气图资料)



时间从 2009 年 7 月 18 日 00 00 至 19 日 12 00 共 36 h 时间间隔为 6 h 实况的路径数据来自佛山气象局
图 3 三个模拟试验的台风路径和实况路径 (用 OBS 标示)

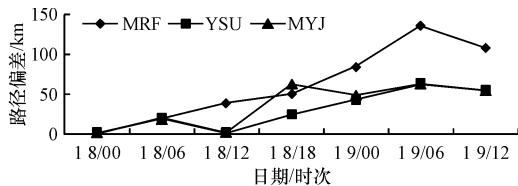


图 4 三个模拟试验的路径偏差

3.3 边界层参数化方案对台风强度的敏感性

对台风“莫拉菲”强度的描述,是通过最大地面风速和最低海平面气压两个方面来进行的。本研究模式输出台风强度的时间间隔是 3 h 选取了 D03 区域从 18 日 00 00 至 19 日 00 00 的 9 个时次的强度结果,加上 D01 区域从 19 日 03 00 至 19 日 12 00 的 4 个时次的强度结

果共同表述台风“莫拉菲”的强度。由于 NCEP 资料的初始台风涡旋比实况弱,所以 CTL 试验的初始场中加入了 Bogus 人造涡旋,以加强台风初始涡旋,减小初始误差。图 5 和图 6 给出 3 个模拟试验在模拟时间段的台风中心气压和中心最大风速与国家气象中心发布的实况结果。从图 5 可知,3 个模拟试验的台风中心气压相差不大,但较台风实况中心气压都偏低,在 18 日 12 00 到 15 00 最接近实况。台风中心附近地面的最大风速(图 6)可以看到在整个模拟时间段里,MYJ 方案的最大中心风速都是最大的。在 18 日 21:00 前,实况中心附近最大地面风速最大,所以 MYJ 方案模拟结果最接近,而 YSU 与 MRF 方案相对模拟风速比较小,但 YSU 方案比 MRF 方案较好。在 18 日 21:00 MYJ 方案的中心最大风速为最大,YSU 次之, MRF 最小,这与图 2 的环境场分析结果一致。在 18 日 21:00 以后,实况中心附近最大地面风速是最小的,而 YSU 方案的最大地面中心风速比 MRF 方案和 MYJ 方案都要小,最接近实况。

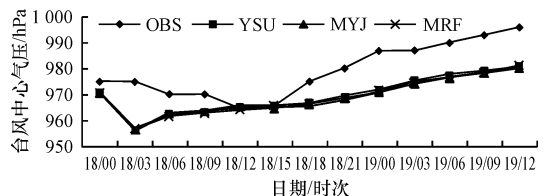


图 5 三个模拟试验在模拟时间段的台风中心气压

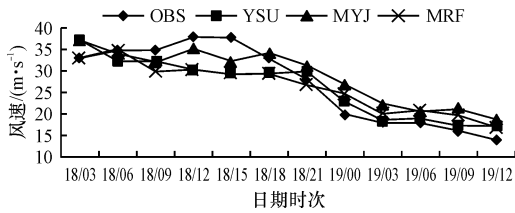


图 6 地面台风中心最大风速

从以上分析可知, MYJ 方案模拟的台风强度最大, 但 YSU 方案模拟的中心附近地面最大风速与实况最接近, YSU 方案模拟的台风强度与实况台风强度最为接近。

3.4 边界层参数化方案对降水的敏感性

在台风发生、发展和加强过程中, 边界层的水汽供应是非常重要的, 而水汽又主要反映在降水里, 所以通过对 3 个不同边界层试验对降水的模拟与实况对比。实况累积降水资料来自广东省水文局的水雨情自动测报系统。

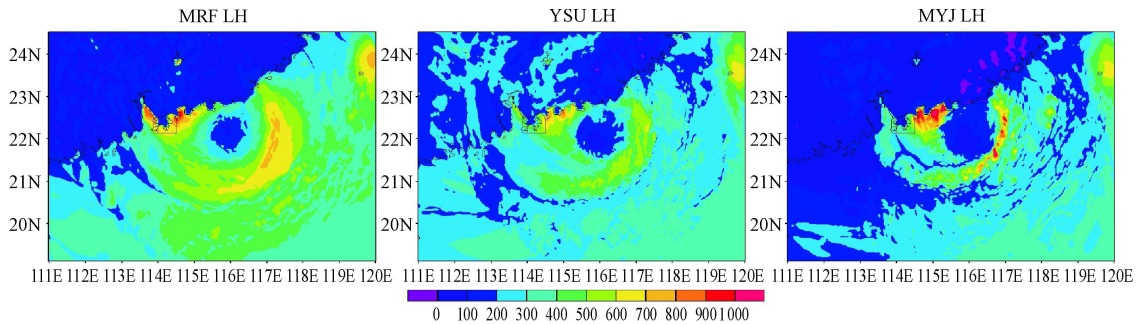


图 7 2009 年 7 月 18 日 12 00 的 3 个边界层方案下的潜热通量分布 (单位: W/m^2)

从 3 个边界层方案的潜热通量分布看, 潜热通量的数值在海洋和陆地上都是正值, 表明边界层将能量向上输入台风。台风中心附近为潜热通量的低值区, 由台风中心向外潜热通量逐渐增加, 在台风眼壁附近的最大风速区潜热通量达到最大。潜热通量沿台风中心呈明显的非对称分布, 高值中心都出现在台风西北侧和东面。在 3 个边界层方案中 MYJ 方案的潜热通量最高, 达 $1300 W/m^2$ 以上, MRF 方案次之, 最大值约为 $900 W/m^2$, YSU 方案最小, 最大值约为 $800 W/m^2$ 。3 个方案的大值区分布形势基本一致。由 3 个边界层方案计算得到的潜热通量大小与台风强弱成比较一致的对应关系。潜热输送越大, 台风强度越强; 潜热输送越小, 台风强度越弱。台风强弱与潜热通量大小一致现象可由 CISK 机制^[4]得到较好解释: 台风在边界层是一个辐合区, 通过 Ekman 抽吸作用, 导致 Ekman 层顶上垂直速度增大, 使海面上空的潮湿空气强迫抬升。在不稳定的未饱和大气中当空气质点被抬升至凝结高度后, 引起积云对流发展。积云对流释放凝结潜热使对流层中、上部不断增暖, 并使高层气压升高, 产生辐散。高层辐散又促使低层台风中心的气压下降, 气压下降出现指向台风中心的气流, 产生辐合。由于绝对角动量守恒, 切向风速增大, 低压环流增强, 结果使对流更强, 凝结加热更厉害。这样循环, 造成积云对流

与低压间的正反馈, 使台风低压得到加强。MRF 方案和 YSU 方案凝结潜热释放较小, 台风强度比较弱。而 MYJ 方案计算的潜热通量异常偏高, 这是由于 MYJ 方案采用 2.5 级的 Mellor-Yamada 方案在计算地表通量时受垂直分辨率层数和模式变量等影响大而且非常敏感, 容易产生计算的通量偏大并导致模式在温暖的洋面上产生虚假的降水现象。

4 台风强度和降水差别成因

潜热和感热输送是边界层的主要物理过程, 对台风发生发展起着十分重要的作用^[5]。潜热通量表示由于水的相变而导致的热量变化, 而感热通量是由于海气温差导致的热量交换。我们选取 18 日 12 00 进行分析。图 7 给出了 18 日 12 00 的 3 个边界层方案下的潜热通量分布。

感热通量的分布形势 (图略) 与潜热通量基本相似。台风的中心感热通量接近 0 然后从中心向外围逐渐增加, 在台风眼壁附近的最大风速区达到最大值。其中 MYJ 方案的最大感热通量达到 $250 W/m^2$, YSU 方案次之, 约为 $150 W/m^2$, MRF 方案最小, 约为 $100 W/m^2$ 。陆地上的感热通量基本上都是负值, 其中 YSU 方案的陆地上的感热通量最低, 达到 $-250 W/m^2$ 以下, 越靠近台风负值越低, 说明陆地因为感热通量的作用降低了台风的能量。由于是晚上时分, 近洋面的温度高于陆面的温度, 洋面上也通过感热的方式加热台风, 为台风提供能量。在靠近台风的陆地上台风产生大量的降水, 进一步降低了地表的温度, 使靠近台风的陆地感热通量最小。

感热通量的分布形势 (图略) 与潜热通量基本相似。台风的中心感热通量接近 0 然后从中心向外围逐渐增加, 在台风眼壁附近的最大风速区达到最大值。其中 MYJ 方案的最大感热通量达到 $250 W/m^2$, YSU 方案次之, 约为 $150 W/m^2$, MRF 方案最小, 约为 $100 W/m^2$ 。陆地上的感热通量基本上都是负值, 其中 YSU 方案的陆地上的感热通量最低, 达到 $-250 W/m^2$ 以下, 越靠近台风负值越低, 说明陆地因为感热通量的作用降低了台风的能量。由于是晚上时分, 近洋面的温度高于陆面的温度, 洋面上也通过感热的方式加热台风, 为台风提供能量。在靠近台风的陆地上台风产生大量的降水, 进一步降低了地表的温度, 使靠近台风的陆地感热通量最小。

5 小结

本研究利用 WRF 中尺度模式在不同边界条件下对

2009年第6号台风“莫拉菲”登陆前后的主要过程进行了数值模拟,在此基础上分析了边界层参数化方案对台风的大环境场、路径、强度、累积降水和感热通量与潜热通量的影响,可以获得一些初步结论。

总体上说,3个边界层方案对大环境场的海平面气压场影响不大,与实况比较一致,而水平风速就出现MYJ方案的风速最大,YSU方案次之,MRF方案最小的情况。在台风强度方面,YSU方案模拟的台风强度与实况台最为接近;MYJ方案模拟的台风强度最大。从台风路径和路径偏差来看,YSU方案对台风路径模拟最好,路径偏差最小。在36h累计降水方面,3个试验方案模拟的累积降水分布形势与实况比较一致,MYJ方案的36h的累积降水量最多,YSU方案次之,MRF方案最少。

通过对感热通量和潜热通量分析,可以看到MYJ方案的感热通量和潜热通量都是最大,这正可以解释在台风强度方面,为什么MYJ的模拟台风强度是最大的问题。因为潜热通量对台风的维持是非常重要的,台风的主要能量来源于潜热的释放。

从以上对比分析可见,YSU方案通过增加显式处理的夹卷过程后,比MRF方案在模拟结果有明显的改善。在两种不同的闭合方案的比较中,非局地K理论方案和TKE闭合方案中,YSU方案在对台风路径、强度、降水方面与实况比较相似,MYJ方案在台风强度方面出现过强的情况,主要是因为2.5级的Melbor-Yanadar方案在计算地表通量时受垂直分辨率层数和模式变量等影响大而非常敏感,容易产生计算的通量偏大导致台风过强。

综上所述,对台风“莫拉菲”的数值模拟选用YSU方案的模拟结果与实况比较一致。下一步的工作还要在不同边界层方案下,对台风的内核动力和热力场结构进行对比分析,以及了解这些边界层过程是如何对台风上部自由大气的强度和结构产生影响的。

本研究的计算在中山大学网络与信息技术中心的高性能与网格平台上完成,特此致谢!

参考文献:

- [1] 高守亭. 行星边界层内低涡的环流结构[J]. 气象学报, 1983 41: 285-295
- [2] 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 317.
- [3] 王栋梁, 梁旭东. 台风数值模拟中 β 涡旋四维变分同化的研究[J]. 南京气象学院学报, 2004 27(4): 502-510
- [4] 陈炯, 王建捷. 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(4): 11-17
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 刘燕, 林良勋. 登陆福建的热带气旋对广东降水的影响[J]. 广东气象, 2007 29(2): 14-17.
- [8] 张录表, 邹思为, 郑勇, 等. 强热带风暴“碧利斯”大暴雨的数值模拟试验和成因分析[J]. 广东气象, 2007 29(4): 24-26
- [9] 黄小丹, 周武. “派比安”在阳江不同地区的风场特征及防风问题[J]. 广东气象, 2007 29(2): 26-28
- [10] 李天然, 吴婉萍, 林良勋. 强台风“珍珠”异常路径的特点、成因及预报[J]. 广东气象, 2006(3): 18-22
- [11] 程正泉. 登陆台风与环境因子相互作用对暴雨的影响研究综述[J]. 广东气象, 2008 30(5): 4-7
- [12] 马红云, 何伟芬, 王永青. 两类不同路径热带气旋登陆前后的总能量对比分析[J]. 广东气象, 2008 30(1): 35-39
- [13] 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——对台风结构的影响[J]. 大气科学, 2005 29(3): 417-428
- [14] 段朝霞, 苏百兴, 黄莉莉. 0814强台风“黑格比”西折、快速移动和强度分析[J]. 广东气象, 2010 32(1): 18-21
- [15] 陈联寿. 对非对称结构及移速突变台风的预报[J]. 广东气象, 1997 19(8): 12-13
- [16] 周静, 李厚伟, 唐洁, 等. 0606号台风暴雨的物理量诊断分析[J]. 广东气象, 2008 30(4): 32-35
- [17] 张东, 蔡安安, 林良勋. 强热带风暴“碧利斯”致洪暴雨的特征及成因[J]. 广东气象, 2007 29(1): 22-24