

文章编号: 2096-1618(2017)05-0513-11

# WARMS 2.0 中边界层参数化方案对一次台风外围降水模拟预报的影响

代昕鹭<sup>1,2,3</sup>, 陈葆德<sup>2,3</sup>, 张旭<sup>2,3</sup>, 范广洲<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室 气候与环境变化联合实验室, 四川成都 610225; 2. 上海区域高分辨率数值预报创新中心, 上海 200030; 3. 中国气象局上海台风研究所 中国气象局台风数值预报重点实验室, 上海 200030)

**摘要:**为分析高分辨率数值预报模式下不同边界层参数化方案对降水过程的模拟结果及边界层参数化方案中局地混合与非局地混合作用对模拟结果产生的不同影响,利用华东区域中尺度数值预报系统 WARMS 2.0,使用不同边界层参数化方案对一次台风外围强降水过程进行模拟,得出主要结论:非局地混合 YSU 方案对强降水中心位置的模拟能力最好,且对台风雨带结构的模拟更准确明显,但模拟降水的强度偏大;局地混合 MYJ 方案容易产生小量级虚假降水;未使用边界层参数化方案时的模拟能力最弱,降水范围小、强度弱,与实况相比差异较大。在对强降水过程进行模拟时,非局地混合方案在垂直方向上的湍流作用更强,模拟的强降水范围和强度均大于局地混合方案。由降水检验来看,非局地混合 YSU 方案的预报技巧优于其他方案,易模拟出较大量级降水,而局地混合 MYJ 方案更容易预报出较小量级的降水。

**关键词:**气象学;数值天气预报;边界层参数化方案;局地混合;非局地混合;高分辨率数值预报模式;降水

**中图分类号:**P435

**文献标志码:**A

**doi:**10. 16836/j. cnki. jcuit. 2017. 05. 009

## 0 引言

大气边界层是受地球下垫面影响较大的一层大气,其运动表现为明显的湍流特性,特别是对于动量、热量和水汽等物理量的输送,为边界层中大气受地面动力与热力作用影响而表现最明显的性质<sup>[1-4]</sup>。大气边界层的厚度在陆地上空有很强的空间和时间变化性,白天边界层的厚度一般较厚,而夜间较薄,变化区域介于0.1~3 km<sup>[1]</sup>。大气边界层的结构和演变对各种天气现象都起非常重要的作用。

如今计算机的计算能力进步飞速,数值预报模式与资料同化技术也不断发展,利用高分辨率数值模式预报如暴雨、台风等对人类生活息息相关且影响较大的天气现象的演变非常重要。数值预报模式中现有的边界层参数化方案按类型主要分仅考虑单独格点的局地闭合方案及综合考虑周边格点影响的非局地闭合方案<sup>[5-9]</sup>。

近年,国内外大量学者研究使用不同的边界层参数化方案对数值模式预报效果的影响。Hong 和 Pan<sup>[10]</sup>发现边界层中的垂直混合强度是中尺度数值模式降水预报能力的重要影响因子,而垂直混合强度则

是由边界层参数化方案决定;Jankov 等<sup>[11]</sup>使用 WRF 模式中不同的边界层方案对模拟暴雨,发现使用方案不同时,模拟的结构差异也较大;当模式水平分辨率为20 km时,陈炯和王建捷<sup>[12]</sup>通过设置不同的边界层参数化方案对照试验,研究 WRF 模式对江淮暴雨的模拟能力,发现使用边界层参数化方案后,边界层中物理量的垂直输送过程和各过程之间的相互作用会间接影响降水,模式从使用边界层参数化方案之后对江淮暴雨的模拟较之不使用时与实况降水更接近,模拟能力有显著提高;赵鸣等<sup>[13]</sup>总结了近年中国学者们有关边界层对暴雨天气影响的研究结果后,发现边界层参数化方案对暴雨影响明显,改进能影响对暴雨中心位置及雨量的模拟结果,使模拟更为准确;徐慧燕等<sup>[14]</sup>在对三次长江下游地区的暴雨过程进行模拟分析后发现,使用 WRF 模式中的7种边界层参数化方案对降水分布、基本气象要素场等进行模拟时,QNSE 方案的效果最好。

目前多数研究未能在高分辨率数值预报模式中对不同边界层参数化方案的局地混合与非局地混合作用在降水模拟中的影响开展广泛深入的研究,因此文中将使用水平分辨率高达9 km的数值预报模式,在不同类型边界层参数化方案的条件下,对一次台风外围雨带影响的强降水过程进行模拟与分析。

收稿日期:2017-04-25

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(41505087);国家自然科学基金面上资助项目(41575101)

# 1 数值模式和边界层参数化方案介绍

## 1.1 模式介绍

使用华东区域中尺度数值预报系统 WARMS 2.0 (WRF ADAS real-time modeling system 2.0, WARMS 2.0) 基于 ADAS-WRF 建立, ADAS (ARPS data analysis system) 以 GFS 分析场或预报场为初猜场, 同化各种观测资料之后得到 WRF (weather research forecast) 模式的初始场与侧边界条件。

ADAS 是一套气象数据分析同化系统, 依靠复杂的云分析模块实现非绝热初始技术。目前 ADAS 同化了多种观测数据, 主要包括探空观测和地面气象站观测, 其中包括常规天气观测、船舶观测、机场地面报、浮标、自动气象站和飞机观测和雷达、卫星数据。雷达反射率、卫星 FY2C 的红外和可见光通道数据是由复杂云分析系统引入。

系统中使用的 WRF 模式是目前发展较成熟且常用的一种中尺度大气数值模式, 使用的 WRF-ARW V3.5.1 版本发布于 2013 年。WRF 模式适用的天气系统尺度广泛, 小到几米, 大至几千米, 其中包含了多类不同的物理方案, 着重讨论的是不同边界层参数化方案在模拟时带来的作用和影响。

## 1.2 边界层参数化方案介绍

使用的边界层参数化方案包括:

(1) Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) 方案<sup>[15]</sup> 是一种局地闭合方案, 其在近地层以上的湍流采用的是 Mellor 和 Yamada<sup>[16]</sup> 的 2.5 级湍流闭合方法表示, 湍流扩散系数通过湍流动能 TKE 计算, 其预报方程为:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \rho \overline{w'e'} - \overline{u'w'} \frac{\partial u}{\partial z} - \overline{v'w'} \frac{\partial v}{\partial z} + \beta \overline{w'\theta'} - \varepsilon \quad (1)$$

方程中  $e$  是湍流动能,  $\beta$  是浮力系数,  $\varepsilon$  是耗散作用。其中  $\overline{w'u'} = -K_m \frac{\partial u}{\partial z}$ ,  $\overline{w'v'} = -K_m \frac{\partial v}{\partial z}$ ,  $\overline{w'\theta'} = -K_h \frac{\partial \theta}{\partial z}$ ,  $\overline{w'e'} = -K_e \frac{\partial e}{\partial z}$ 。式(1)等号右侧的第 2、3 和第 4 项分别为风切变带来的湍流动能与浮力带来或消耗掉的湍流动能。MYJ 方案的边界层高度由 TKE 廓线决定。

(2) Yonsei University (YSU) 方案<sup>[17]</sup> 是一种非局地闭合方案,  $\overline{(w'c')_h} \left(\frac{z}{h}\right)^3$  是方案在边界层顶的夹卷通量,  $\overline{(w'c')_h}$  是逆温层通量。方案的扩散方程写为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \overline{w'c'} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_c \left( \frac{\partial C}{\partial z} - \gamma_c \right) - \overline{(w'c')_h} \left( \frac{z}{h} \right)^3 \right] \quad (2)$$

方程中的  $C$  为预报变量,  $\overline{w'c'}$  为次网格扰动通量,  $K_c$  为湍流扩散系数,  $\gamma_c = b \frac{\overline{(w'c')_0}}{w_{s0} h}$  为反梯度通量。YSU 方案的边界层高度使用理查逊数进行估算。

# 2 方案设计与资料选取

## 2.1 模拟试验个例介绍

使用 WARMS 2.0 对一次强降水过程个例进行研究, 以分析使用不同边界层参数化方案及方案中局地混合和非局地混合作用在高分辨率数值预报中对降水带来的影响。其中选取的个例为 2015 年 8 月下旬主要由中国东部一次受台风外围雨带影响的强降水过程<sup>[18]</sup>, 模拟时间为 2015 年 8 月 23 日 08 时至 2015 年 8 月 26 日 08 时 (北京时, 下文同)。

台风“天鹅”(1515) 于 2015 年 8 月 15 日凌晨在西北太平洋洋面生成后向偏西方向移动, 21 日夜间于台湾省东南方向洋面上转为向西北移动, 25 日登陆日本九州并穿过日本海, 27 日登陆海参崴并于黑龙江填塞。其中 23 日 20 时至 25 日 02 时“天鹅”达到超强台风的强度, 同时与中国华东沿海地区的强降水时间相一致。

## 2.2 模拟试验方案设计

模式初始场和侧边界条件的分辨率为 9 km, 模式网格格距也为 9 km, 总格点数为 760 (东西向)  $\times$  600 (南北向), 模拟区域如图 1 所示。模式在垂直方向上使用的是地形追随坐标, 为非等距的 51 层, 模式顶层气压为 30 hPa, 积分时间步长为 45 s。模拟实验具体使用的参数化方案详见表 1。

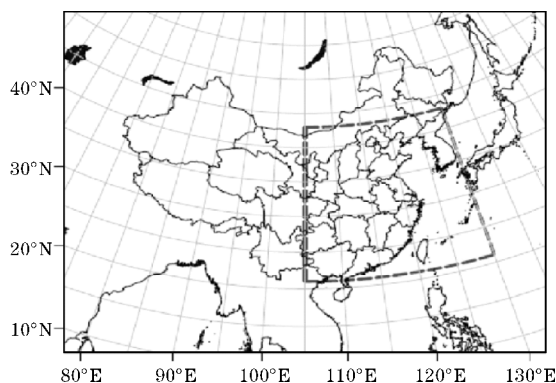


图1 模式模拟区域(方框内为华东区域: 21°N ~ 43°N, 105°E ~ 130°E)

表 1 数值模拟实验方案设计

	空白对照试验 NOPBL	YSU	YSU-2	MYJ
边界层参数化方案	无	使用 YSU 方案	使用 YSU-2 方案	使用 MYJ 方案
微物理过程方案		使用 Tompsom 冰雹方案		
长波辐射方案		使用 rrtmg 方案		
短波辐射方案		使用 rrtmg 方案		
陆面过程方案		使用 Noah 方案		
积云参数化方案		无		
城市物理方案		无		

表 1 中设置 YSU-2 方案是为了研究非局地混合项在模式中所起到的具体作用,使该方案仅包含局地混合作用。该试验将 YSU 方案中的扩散方程式改为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \overline{w'c'} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_c \left( \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right]$$

(3)

即将(2)式中的反梯度通量项 $\gamma_c = b \frac{\overline{(w'c')}_0}{w_{s0}h}$ 与夹卷通量项 $\overline{(w'c')}_h \left( \frac{z}{h} \right)^3$ 均设为 0。

2.3 实况资料选取

考虑到实况资料所需的公认度与高质量,用于模式对比与评估检验的降水观测资料为 MICAPS 实况资料,时间段选取与模式模拟时段相对应的 2015 年 8 月 23 日 08 时至 2015 年 8 月 26 日 08 时。

3 结果分析

3.1 降水空间分布分析

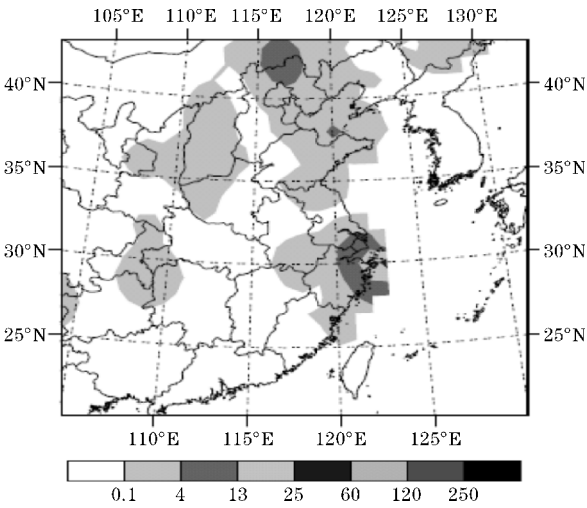


图 2 8 月 23 日 08-14 时华东区域 MICAPS 实况 6 小时累计降水空间分布图

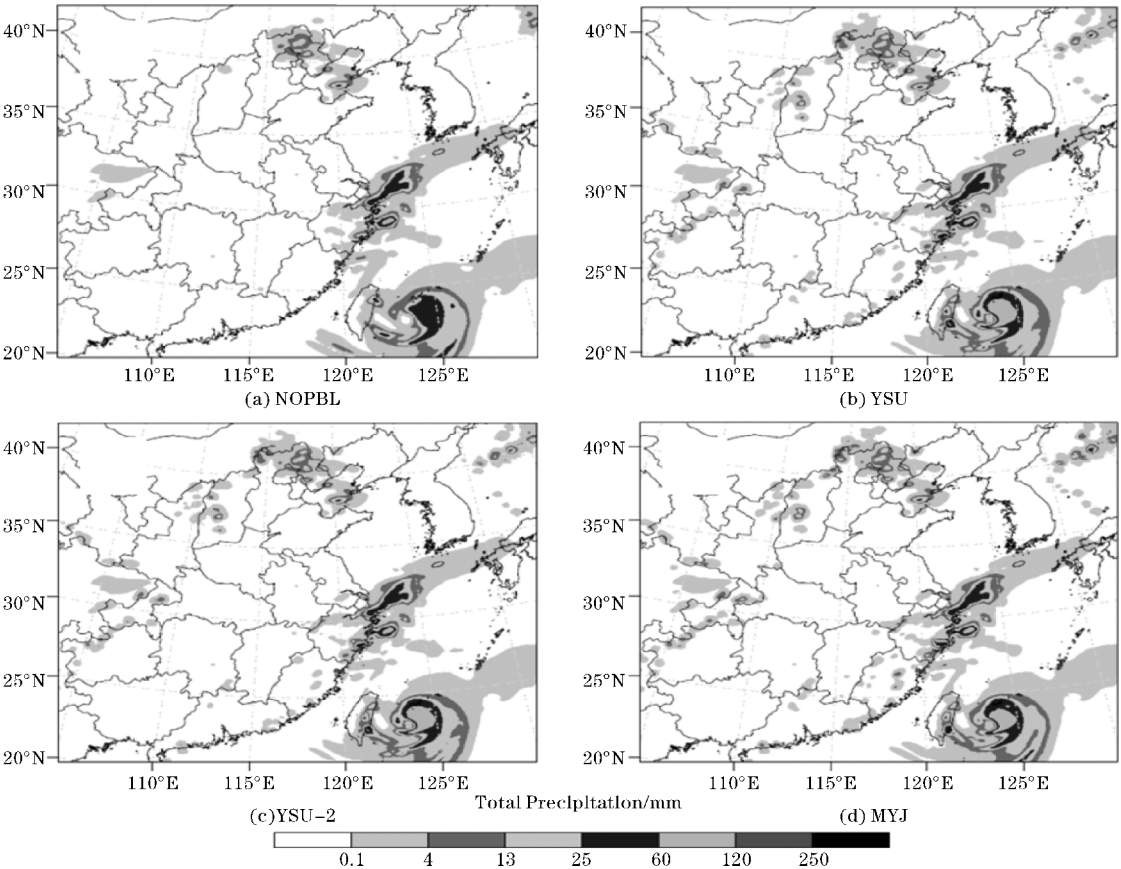


图 3 8 月 23 日 08-14 时华东区域模拟 6 小时累计降水空间分布图



降水过程主要分两个时段,第一段在于23日晨至午间时段,降水区域主要集中在受台风外围云系影响的华东沿海区域。对比分析包含该主要降水时段在主要降水区域的6小时累计降水空间分布,陆面上实况(图2)的降水区域主要集中在上海周边及浙江东部沿海地区,华北和西南部分地区也有一定程度的降水。位于浙江东部沿海的最强降水中心6小时累计雨量超过25 mm。模式使用YSU、YSU-2和MYJ方案均模拟出了这个时段降水的中心、大致范围和强度,3种方案之间的差异并不十分显著,由图3(b)、3(c)可看出YSU方案与YSU-2方案相比,降水范围和强度略大,这可能是由于YSU方案中非局地混合作用带来的。局地混合MYJ方案(图3d)与非局地混合YSU方案相比,浙江东部沿海降水中心的强度略小,但4 mm以下强度较弱的降水范围更宽。未使用边界层参数化方案时(图3a)明显偏小于实况降水范围,特别是在华北的部分区域,没有模拟出其较弱的降水区域,这可能是由于不使用参数化方案时,低层水汽难以通过湍流的混

合作用由下往上输送,其降水仅由高空平流等过程带来。在对台湾岛以东的海上台风雨带结构模拟时,能看出模式使用非局地混合YSU方案相较于其他3个方案,模拟出的台风结构更好,降水强度也更强。

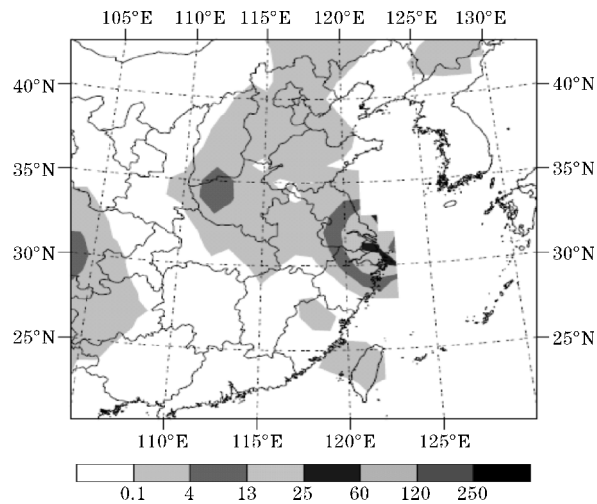


图4 8月24日08-14时华东区域MICAPS  
实况6小时累计降水空间分布图

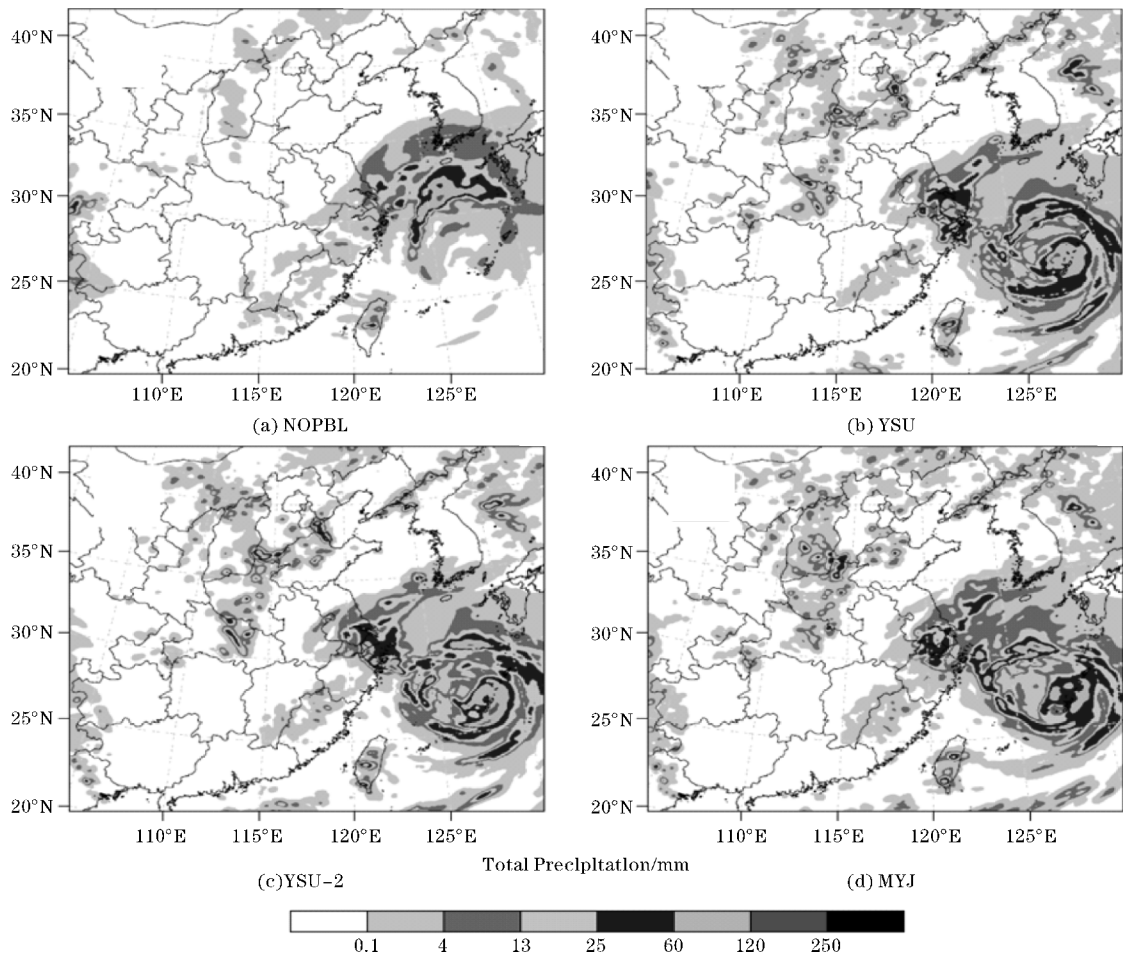


图5 8月24日08-14时华东区域模拟6小时累计降水空间分布图

降水过程的第二个主要时段在于24日上午,分析24日08时至14时华东区域的6小时累计降水空间

分布,陆面降水实况(图4)的强降水雨区分布与23日相比有所北移且范围扩大,降水中心位于上海及周边

地区,强度较前一天也有加强。图 5(b)和 5(c)中 YSU 方案与 YSU-2 方案相比而言,YSU 方案模拟在上海地区的降水中心更准确,但强度较大,6 小时累计降水量近 120 mm,而 YSU-2 方案模拟的降水中心位置与实况相比略有偏南,上海地区的 6 小时累计降水低于 60 mm。图 5(d)中局地混合 MYJ 方案模拟的降水中心与实况相比偏西,其降水强度弱于非局地混合 YSU 方案,但小量级降水区域的范围较之实况更多。总的来说,局地混合 MYJ 方案模拟强降水的能力更弱,且容易产生小量级虚假降水;非局地混合 YSU 方案对强降水中心位置的模拟能力最好,且对中国东部洋面上的台风雨带的模拟更为准确,结构特征也更加明显,但模拟降水的强度偏大,这可能是由于它较强的垂直湍流混合作用造成。未使用边界层参数化方案时(图 5a),模式模拟的降水范围小、降水强度弱,与实况相比差异

较大,且并没有成功地模拟出中国东部洋面上的台风雨带结构。

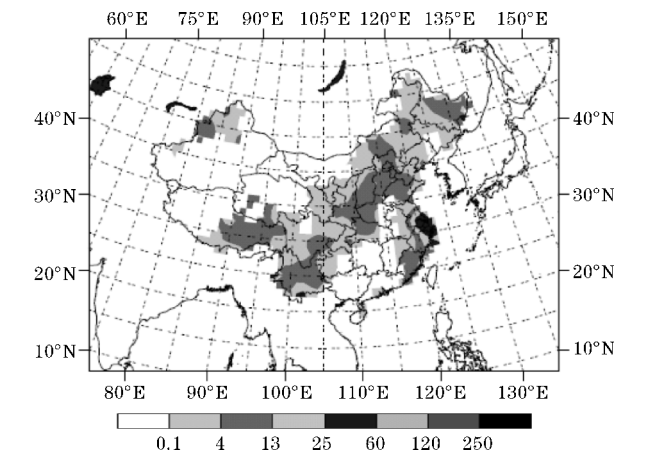


图 6 8 月 23 日 08-24 日 08 时全区域 MICAPS 实况 24 小时累计降水空间分布图

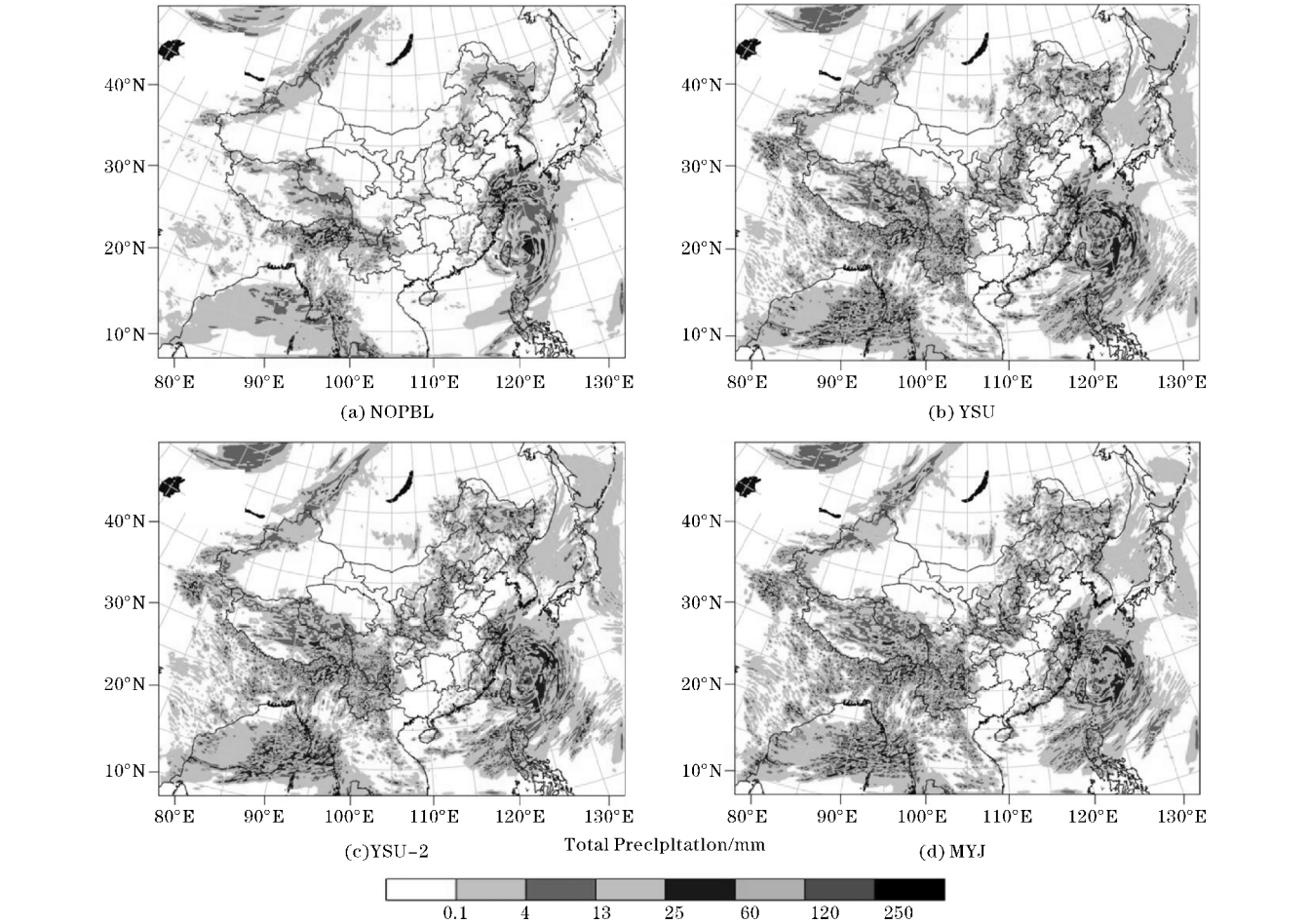


图 7 8 月 23 日 08-24 日 08 时全区域模拟 24 小时累计降水空间分布图

图 6、图 7 分别为 23 日 08 时至 24 日 08 时,24 小时累计降水的实况与各边界层参数化方案模拟在模式全区域范围内的空间分布图。由图 6 可看出,在这 24 小时内,中国大陆降水的地区较多,降水强度较大的区域主要集中在东部沿海,其次华北和西南部分地区的

降水也较强,西北地区有一些小面积的弱降水。图 7 中可看出 YSU、YSU-2 和 MYJ 3 种方案均模拟出中国东南部洋面上的台风雨带结构,局地混合 MYJ 方案模拟的 13 mm 以下较小量级降水比 YSU 和 YSU-2 方案多,而 60 mm 以上的降水明显较少。YSU 和 YSU-2 方案



之间的降水在海上的差异比陆地明显,这是由于海洋与陆地的下垫面性质不同而引起。非局地 YSU 方案模拟的强降水区域的中心位置与实况相比较相似,降水范围和强度均大于 YSU-2 方案,且对台风雨带的结构特征模拟也更准确明显。陆地上的强降水区域主要集中在东部沿海与西南部分地区,YSU 方案模拟的强降水范围大与 YSU-2 方案,强度也较强;MYJ 方案模拟的降水强度与 YSU 方案相比较弱,但 3 种方案均模拟了西北地区较小面积的弱降水。当未使用边界层参数化方案时,模式模拟的降水范围与实际降水相比明显偏小,降水强度整体偏弱,亦未能成功模拟出中国东部洋面上台风雨带结构。

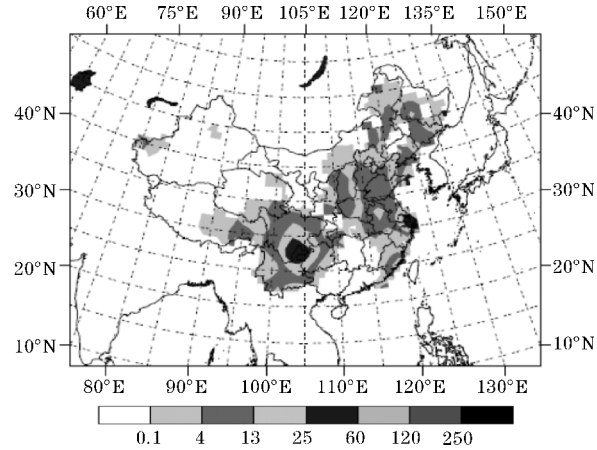


图 8 8 月 24 日 08-25 日 08 时全区域 MICAPS 实况 24 小时累计降水空间分布图

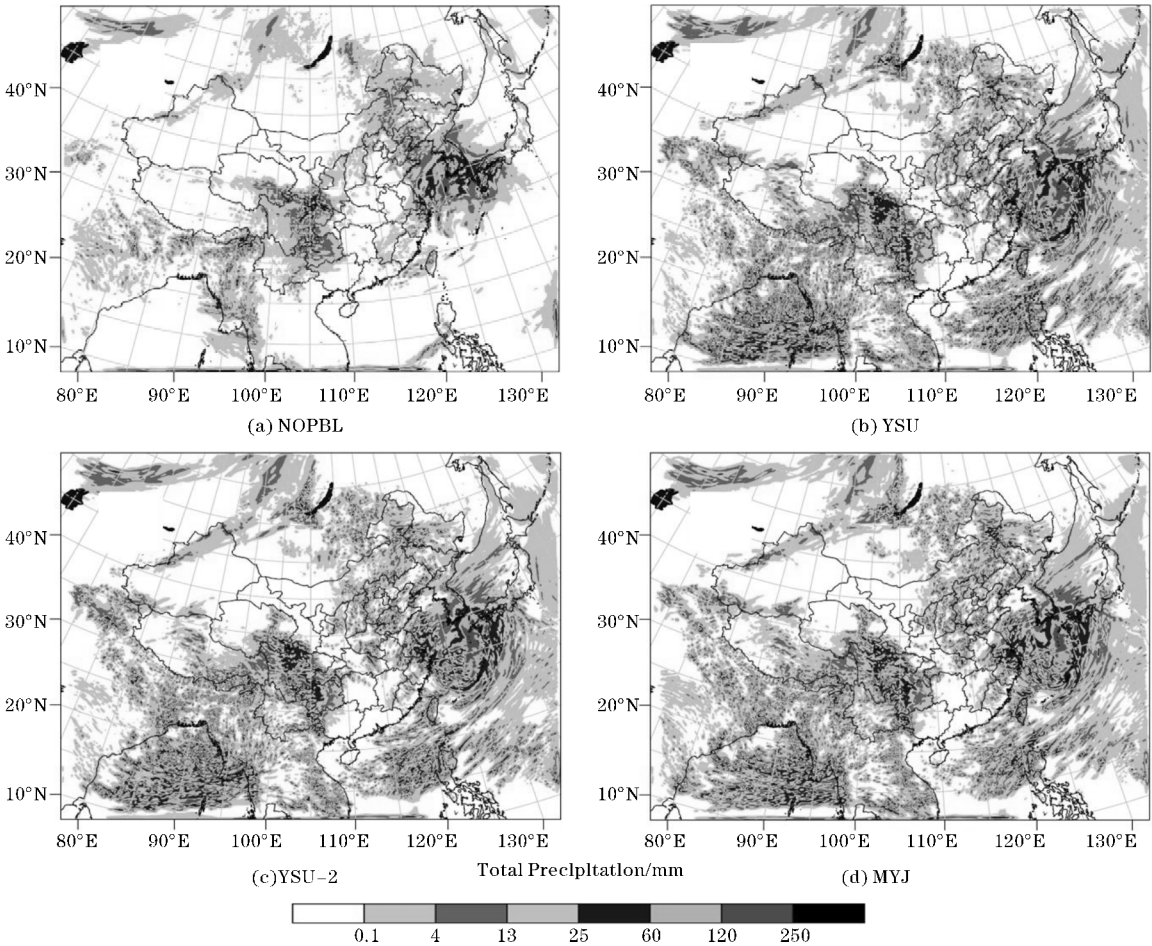


图 9 8 月 24 日 08-25 日 08 时全区域模拟 24 小时累计降水空间分布图

图 8、图 9 分别为 24 日 08 时至 25 日 08 时,24 小时累计降水的实况与各边界层参数化方案模拟的在模式全区域范围内的空间分布图。从图 8 可看出,在这段时间内,降水的区域的整体范围与前一天相比较相似,降水强度较大的区域集中在东部沿海和西南地区,上海及周边地区的强降水中心范围较前一天有所减小,而西南地区的降水增强,范围扩大,降水大值中心由北向南移至四川南部与云南北部,累计降水量接近

60 mm。图 9 中可看出 YSU、YSU-2 和 MYJ 3 种方案均模拟出了中国东部洋面上台风雨带结构由南向北的移动趋势,局地混合 MYJ 方案模拟的 60 mm 以上较大量级降水依然比 YSU 和 YSU-2 方案少,且没能较好模拟上海及周边地区的大值中心。非局地 YSU 方案模拟的强降水区域的中心与实况相比更接近,强降水区域的范围和强度均大于 YSU-2 方案,但与实况相比强度偏大,模拟的台风雨带的结构也更明显。3 个方案

对西南地区的强降水区域的模拟差异不大,YSU 方案模拟的降水最强,MYJ 方案模拟的强降水最弱,但 3 种方案与实际降水相比均有不同程度的偏强。当未使用边界层参数化方案时与前一日的模拟结果类似,整体降水范围依然明显小于实际降水,强度较弱,对台风雨带结构及陆地强降水中心的模拟也不准确。总的来说,YSU 方案可能因为其非局地混合作用使湍流的垂直运动更强,从而模拟的降水更强,范围更广。针对以上猜测,将在后文作进一步的验证分析。

3.2 垂直廓线分析

为进一步验证前文所述的非局地混合 YSU 方案的垂直湍流作用更强这一结论,现对降水中心的上海徐家汇站点(121.25 °E,31.11 °N)在强降水时段中的湍流扩散系数垂直廓线进行如下讨论。

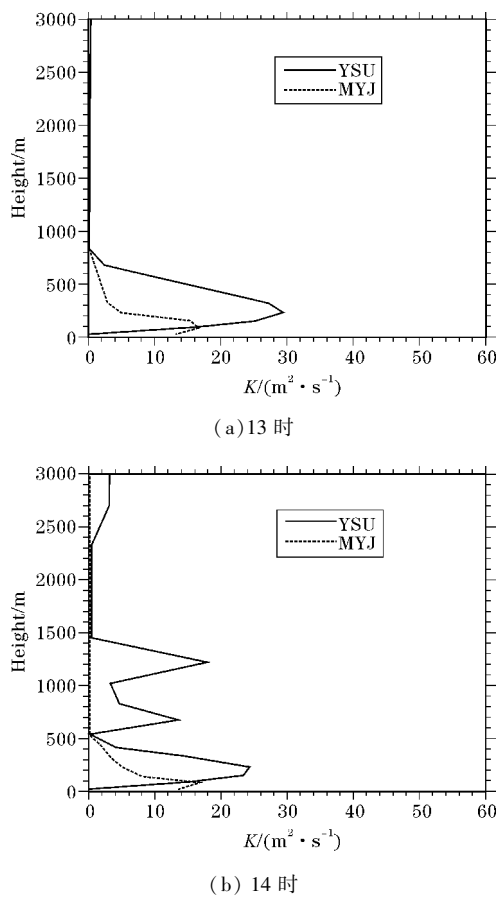


图 10 徐家汇站点在 2015 年 8 月 24 日 13 时和 14 时湍流扩散系数垂直廓线

湍流扩散系数能直接反映不同边界层参数化方案的湍流混合强度,较大的湍流系数表示较强的湍流运动。边界层在中午 13 时与 14 时的垂直混合作用较强,因此选取降水时段中的这两个时刻具有较好的表现能力。由图 10 可看出,在强降水过程中,非局地混合 YSU 方案的湍流扩散系数值明显大于局地混合

MYJ 方案,这一结论证实了前一小节中对降水空间分布进行分析时所得结论的猜测,说明了对强降水过程进行模拟时,非局地混合 YSU 方案的湍流作用更强,更易将低层大气的热量和水汽带入高层大气,从而形成更多更强的降水,因此模拟的强降水范围和强度均大于局地混合方案;局地混合方案的湍流作用较弱,也使各物理量在垂直方向上的输送较弱,强降水偏少;不使用边界层参数化方案时,低层大气的水汽、热量等物理量难以通过湍流混合作用由下往上垂直输送,产生降水最少。

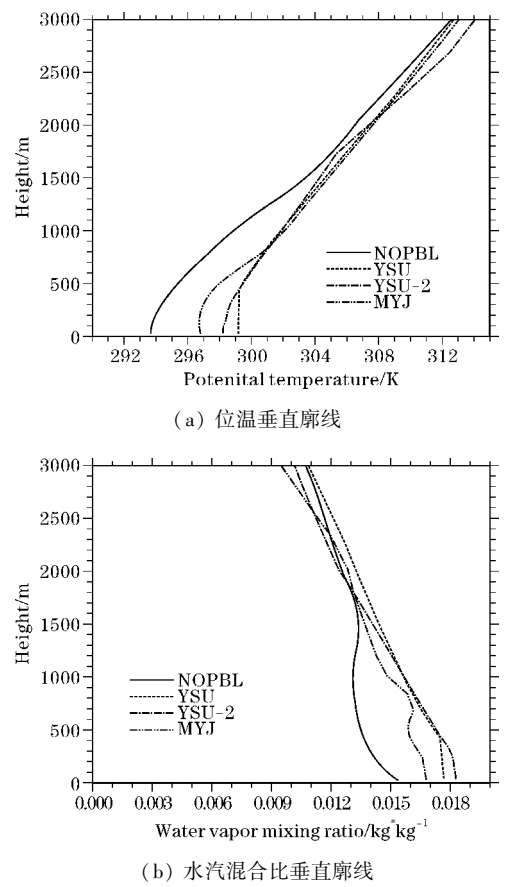


图 11 徐家汇站点各方案在 2015 年 8 月 24 日 09 时 位温垂直廓线和水汽混合比垂直廓线

边界层中位温和水汽混合比的垂直分布也能很好地表现出其垂直湍流运动的作用。由图 11 (a) 可看出,在强降水过程中,各方案模拟的混合层高度整体较低,混合层上部为稳定层。非局地混合 YSU 方案模拟出的混合层高度明显高于另外 3 个方案,其高度在 400 m 左右,边界层底部的位温值也最高,YSU-2 方案次于 YSU 方案;局地 MYJ 方案的混合层高度比 YSU 方案低约 200 m,低层位温与之相比也有明显的冷偏差;而未使用边界层参数化方案时,整个边界层均呈现为稳定层结。水汽混合比垂直廓线(图 11b)大致也能得出与位温垂直廓线相类似的结论,YSU 方案在低层

大气的混合层最为明显,而在高层的水汽较多,这些都说明由于YSU方案的非局地混合作用使得水汽向上的输送更强。以上结论又进一步验证了前文对降水空间分布进行分析时所得的结论。

3.3 降水检验

为了检验模式系统使用这几种不同边界层参数化方案对该次台风影响降水过程在模式全区域范围内的不同量级降水的模拟性能,以下将使用TS评分、空报率和预报偏差这3种不同的降水检验统计方法进行分析。

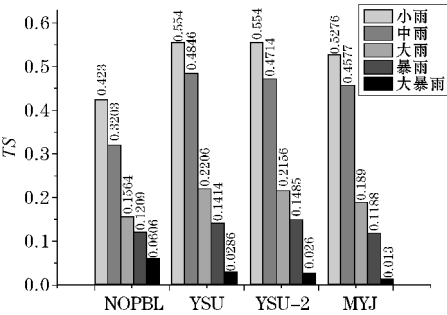
进行降水检验时,对降水量级的划分降水量级划分标准定为:0.1≤R<10 mm时,为小雨;10≤R<25 mm时,为中雨;25≤R<50 mm时,为大雨;50≤R<100 mm时,为暴雨;R≥100 mm时,为大暴雨及以上;其中R为24 h累计降水量。

3.3.1 TS评分

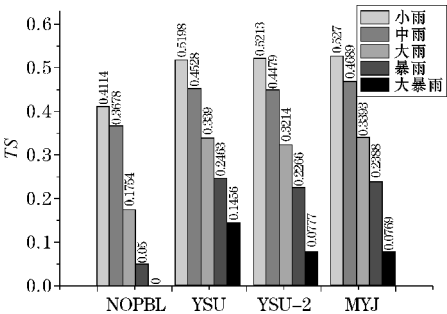
TS评分是较为常见的一种用于对模式降水检验的统计方法,其计算公式为:

$$TS = \frac{n_a}{n_a + n_b + n_c} \tag{4}$$

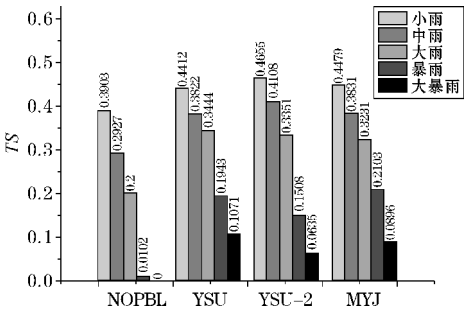
公式(4)中 $n_a$ 为模式需检验区域中预报正确的格点数, $n_b$ 为模式检验区域中空报的格点数, $n_c$ 为模式检验区域中漏报的格点数。TS评分越是接近于0,表示预报的技巧越差;而当TS评分等于1时,则表示模式需检验区域中预报的降水格点数与实际降水格点数完全一致。



(a) 23 日 08 时-24 日 08 时



(b) 24 日 08 时-25 日 08 时



(c) 25 日 08 时-26 日 08 时

图 12 24 h 累计降水 TS 评分

从图12中3天的24 h累计降水TS评分可以看出,无论使用哪一种边界层参数化方案,小雨量级的评分都高于其他量级,其次是中雨,随后顺序分别为大雨、暴雨和大暴雨及以上量级。这说明了随着量级的变大,预报的技巧越差。而对比前后3天的TS评分来看,使用相同参数化方案时的同一量级降水在8月23日至24日(图12a)的评分几乎都高于8月24日至25日(图12b)的评分,8月24日至25日评分又高于8月25日至26日(图12c)评分,这说明了预报评分随着预报时效的推进呈现出下降的趋势。而在同一天的不同参数化方案之间比较来看,使用了边界层方案后的评分与未使用边界层方案时的评分差异较显著,TS评分值明显更高,这说明在高分辨率模式中边界层方案的使用在对降水预报时的作用是十分重要的,无论是对哪一个量级的降水而言,它都会显著提高其预报能力。对比MYJ方案和YSU方案,第一天MYJ方案各量级降水的评分均低于YSU方案,特别是降雨量级较大时的评分,二者差异较明显;第二天MYJ方案的小、中雨评分在约为0.53和0.47,高于同时段的YSU方案,而YSU方案大雨及以上量级的评分则高于MYJ方案和YSU-2方案。未使用边界层方案时的TS评分总是相同情况下最低的。以上结果说明,在对中小量级降水的预报时,模式使用MYJ方案的预报能力较强,但在对大雨及以上量级降水进行预报时,使用YSU方案则具有更强的预报能力,这也是由于YSU方案中的非局地混合作用,使边界层中湍流的垂直混合作用更强而带来的。

3.3.2 空报率

空报率FAR也是较常见的一种用于对模式降水检验的统计方法,其计算公式为:

$$FAR = \frac{n_b}{n_a + n_b} \tag{5}$$

公式(5)中 $n_a$ 为模式需检验区域中预报正确的格点数, $n_b$ 为空报的格点数。空报率FAR的数值越小说明模式的预报能力越好,FAR为0时说明预报完全正确。



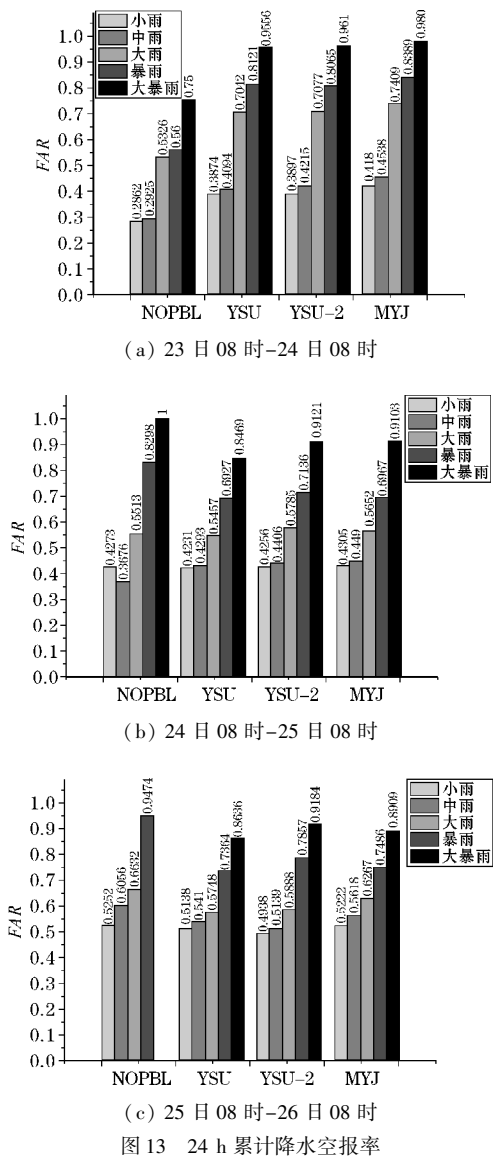


图 13 24 h 累计降水空报率

由 3 日的 24 h 累计降水空报率(图 12)可知,随着降水量级的增加,各不同边界层参数化方案的空报率 FAR 值都基本呈现出上升趋势。模式对大量级降水的预报空报率较高,这可能是由于大量级降水发生的概率较小,但也说明了如今的模式对小概率发生的暴雨、大暴雨量级降水预报依然不够准确,预报能力比较低。使用了边界层参数化方案后模式预报的 24 h 空报率走势相近,特别是 YSU 方案和 YSU-2 方案之间的差异较小。各方案在第一天(图 13a)的小、中雨 FAR 数值较低,大雨及以上量级较高,YSU、YSU-2 和 MYJ 3 个方案之间的差值不明显;第二天(图 13b)YSU、YSU-2 和 MYJ 3 个方案在大雨及以上量级降水的 FAR 数值较之前一天减小,YSU 方案相对而言数值更低,而未使用边界层参数化方案时对暴雨和大暴雨模拟的空报率最高,大暴雨的 FAR 数值达到了 1;第三天(图 13c)与第二天相比,各方案在不同降水量级模拟出的空报率有明显增大。综上表明,在对全区域的整体降水的模

拟中,使用非局地混合 YSU 方案模拟时,其预报技巧也相对其他方案较好,特别是对大量级降水而言空报率较低。

3.3.3 预报偏差

预报偏差  $B$  反映了预报降水发生次数与实际降水发生次数之比,其计算公式为:

$$B = \frac{n_a + n_b}{n_a + n_c} \tag{6}$$

同样,公式(6)中  $n_a$  为模式需检验区域中预报正确的格点数,  $n_b$  为模式检验区域中空报的格点数,  $n_c$  为模式检验区域中漏报的格点数。当预报偏差  $B$  的值大于 1 时,说明模式预报的降水格点范围大于实际降水的范围;反之,预报偏差  $B$  的值小于 1 时,则说明模式预报的降水格点范围小于实际降水范围;当预报偏差  $B$  等于 1 时,标明模式预报较好。

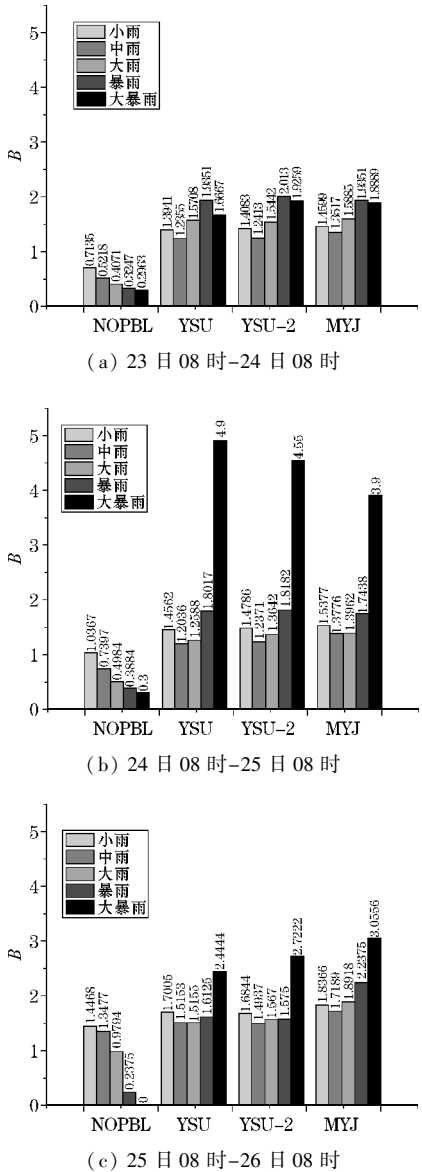


图 14 24 h 累计降水预报偏差

图14中3天的24 h累计降水预报偏差可以看出。使用了边界层参数化方案后模拟出的预报偏差趋势大致相同,而未使用边界层参数化方案时的结果与YSU、YSU-2、MYJ 3种方案的预报偏差差异比较显著,其预报偏差值在对大量级降水模拟时趋近于0,说明预报降水与实况相比偏小很多。模式未使用方案时预报的降水格点范围多小于实际降水范围,且随着降水量级的增加,其B值有偏小越多的趋势,说明其难以预报出大量级降水,这应该由于缺少边界层中湍流的垂直作用造成。而其余3种方案预报的降水格点范围均大于实际降水的范围,特别是第三天(图14c)的大暴雨量级,预报偏差B值偏大很多,这有可能是受预报时效的推进及大量级降水发生的概率较小这一因素影响。整体而言,模式使用非局地混合YSU方案时,其预报偏差值更接近1,对降水的预报偏大较小,相对YSU-2方案和MYJ方案的预报更准确,而MYJ方案在不同量级降水与不同时间的条件下,偏差值更常大于YSU和YSU-2方案,说明局地混合MYJ方案由于方案中的物理特性,更容易预报过多较小量级的虚假降水。

## 4 结论与展望

利用华东区域中尺度数值预报系统WARMS 2.0,使用不同边界层参数化方案对一次台风外围的强降水过程进行模拟,研究在高分辨率数值预报中局地混合和非局地混合的作用及影响,主要结论如下:

(1)由多个时段的累计降水空间分布来看,未使用边界层参数化方案时,对比实况该高分辨率模式的模拟能力最弱,模式模拟的降水范围小、降水强度弱,与实况相比差异较大,且并没有成功地模拟出中国东部洋面上的台风雨带结构;非局地混合YSU方案对强降水中心位置的模拟能力最好,且对中国东部洋面上的台风雨带结构特征的模拟更准确明显,但模拟降水的强度偏大;YSU-2方案相比实际降水与YSU方案而言,模拟的强降水中心的位置略偏;局地混合MYJ方案模拟强降水的能力更弱,且容易产生小量级虚假降水。

(2)总的来说,在对强降水过程进行模拟时,非局地混合方案的湍流作用更强,也更容易将低层大气的热量和水汽带入高层大气,从而形成更多更强的降水,且模拟出的强降水范围和强度均大于局地混合方案,且对台风雨带结构的模拟更系统;局地混合方案的湍流作用较弱,也使各物理量在垂直方向上的运动就较弱,因此来自高层大气的强降水偏少;不使用参数化方案时,水汽和低层大气的热、动量难以通过湍流混合作

用由下往上垂直输送,产生降水最少。

(3)由TS评分、空报率和预报偏差几种对降水检验的统计方法来看,模式使用边界层参数化方案后的预报能力较之不使用边界层参数化方案时有明显增强。非局地混合YSU方案对较大量级降水的模拟预报效果优于其他几种方案,而局地混合MYJ方案更容易预报出较小量级的降水,也易产生过多的虚假降水。

由于受时间等多方面条件的限制,研究工作还不够完善。随着数值模式的不断发展,及计算条件的不断提高,为进一步开展关于评估高分辨率数值预报模式中不同边界层参数化方案所带来的影响和作用的工作,将来在进行研究时还可使用水平分辨率更加精细的模式,如3 km甚至1 km等,来对更多不同种类天气现象的更多个例进行分析,从而得到更多更准确可靠的相关研究结果。

## 参考文献:

- [1] Stull R B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology[M]. An introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht:Kluwer Academic Publishers,1988,22,515-520.
- [2] 杨大升. 动力气象学[M]. 北京:气象出版社,1983:332-357.
- [3] 叶笃正. 动力气象学[M]. 北京:科学出版社,1988:138-153.
- [4] 伍荣生. 大气动力学(修订版)[M]. 北京:高等教育出版社,2002:165-203.
- [5] Troen I B, Mahrt L. A simple model of the atmospheric boundary layer; sensitivity to surface evaporation[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1986,37(1):129-148.
- [6] Stull R B. Transilient Turbulence Theory. Part I: The Concept of Eddy-Mixing across Finite Distances[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1984,41(23):3351-3367.
- [7] Noh Y, Cheon W G, Hong S Y, et al. Improvement of the K-profile Model for the Planetary Boundary Layer based on Large Eddy Simulation Data[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2003,107(2):401-427.
- [8] 张碧辉, 刘树华, 马雁军. MYJ和YSU方案对WRF边界层气象要素模拟的影响[J]. 地球物理学报, 2012,55(7):2239-2248.
- [9] 杨玉华, 刘长海, Jimmy Dudhia, 等. 基于大涡模拟对两类典型边界层参数化方案的评估分析[J].

- 高原气象,2016,35(1):172–180.
- [10] 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.
- [11] Jankov I, Gallus W A, Segal M, et al. The Impact of Different WRF Model Physical Parameterizations and Their Interactions on Warm Season MCS Rainfall [J]. Weather & Forecasting, 2005, 20(6):1048–1060.
- [12] 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(s1):11–17.
- [13] 赵鸣. 边界层和陆面过程对中国暴雨影响研究的进展[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(2):186–190.
- [14] 徐慧燕,朱业,刘瑞,等. 长江下游地区不同边界层参数化方案的试验研究[J]. 大气科学, 2013, 37(1):149–159.
- [15] Janji Z I. The Step-Mountain Eta Coordinate Model:Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer and Turbulence Closure Schemes[J]. Monthly Weather Review, 1994, 122(5),927–945.
- [16] Mellor G L, Yamada T. Development of a Turbulent Closure Model for Geophysical Fluid Problems[J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20(4):851–875.
- [17] 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.
- [18] 曹晓岗,王慧. “8·23–24”上海远距离台风大暴雨影响分析[J]. 气象, 2016, 42(10):1184–1196.

## Impact of Different Boundary Layer Parameterization Schemes on the Numerical Simulation for a Typhoon Rain Event in WARMS 2.0

DAI Xin-lu<sup>1,2,3</sup>, CHEN Bao-de<sup>2,3</sup>, ZHANG Xu<sup>2,3</sup>, FAN Guang-zhou<sup>1</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Joint Laboratory of Climate and Environment Change, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Shanghai Innovative Center of Regional High Resolution NWP, Shanghai 200030, China; 3. Shanghai Typhoon Institute, CMA, Key Laboratory of Numerical Modeling for Tropical Cyclone, CMA, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** In order to analyze the simulation results of precipitation and the effects of local and nonlocal mixing of planetary boundary layer parameterization schemes in high resolution numerical forecast model, WRF ADAS Real-time Modeling System 2.0 (WARMS 2.0) is used. And a case of heavy rainfall process near a typhoon were numerically simulated using different boundary layer parameterization schemes. The main conclusions are as follows: the nonlocal mixing YSU scheme has the best simulation ability about the location of the strong precipitation center and the structure of the typhoon rain belt, but the intensity is stronger; the local mixing YSU scheme is tend to produce a small amount of nonexistent precipitation; without boundary layer parameterization schemes, the simulation capacity of this model is weakest, and the precipitation range is least, moreover, the intensity is weakest, which has a lot of difference with the observed rainfall. The turbulence in the vertical direction is stronger, and the range and intensity of the strong precipitation are larger in the nonlocal mixing scheme. Based on the precipitation tests, the nonlocal mixing YSU scheme is superior to other schemes for the simulation, while the local mixing MYJ scheme is easier to predict the smaller magnitude precipitation.

**Keywords:** meteorology; numerical weather prediction; planetary boundary layer parameterization scheme; local mixing; nonlocal mixing; high resolution numerical forecasting model; precipitation