

文章编号: 2096-1618(2019)05-0543-09

# 边界层参数化方案中局地与非局地混合 在高分辨率数值预报模式中的作用和影响

代昕鹭<sup>1</sup>, 陈葆德<sup>2,3</sup>, 张旭<sup>2,3</sup>, 范广洲<sup>4</sup>

(1. 四川省气象台, 四川 成都 610072; 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; 4. 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)

**摘要:**为研究不同边界层参数化方案以及局地混合作用和非局地混合作用在高分辨率数值预报中的作用与影响, 基于第二代华东区域中尺度数值预报系统, 对两次暴雨天气过程进行了模拟。通过对模拟结果中各边界层物理量进行对比分析, 主要结论如下: (1) 参数化方案中非局地作用越强, 模拟出的边界层垂直湍流混合作用越强, 混合层深厚, 其中动、热能和水汽的垂直输送也较强, 位温垂直廓线在白天也更为稳定。(2) 非局地混合作用在强降水过程中使湍流混合作用更强, 可产生更多降水, 其在大雨及以上量级的降水效率影响最大, 局地混合作用对小量级的降水效率影响较大。(3) 使用了边界层参数化方案后近地层物理量的日变化较未使用边界层参数化方案时更加明显; 而海洋区域各方案均无明显日变化。

**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

**中图分类号:** P457.6

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2019.05.016

## 0 引言

受下垫面动力与热力作用的影响, 行星边界层(planetary boundary layer, PBL) 中大气运动表现出明显的动量、热量与水汽的湍流输送特性<sup>[1-4]</sup>。由于中尺度数值模式的网格距较大(10~50 km), 湍流等次网格尺度的运动无法在数值天气预报模式中显式地给出, 为解决该问题, 次网格湍流运动需采用 PBL 参数化方案来描述。因此, PBL 参数化方案对准确表征边界层热力场和动力场的湍流混合作用至关重要。

近年来, 国内外很多学者在数值天气预报模式中 PBL 参数化方案这方面开展了大量研究工作, 选择不同的 PBL 参数化方案会直接影响数值模式的预报效果。Hong 等<sup>[5]</sup>发现中尺度数值模式中 PBL 参数化方案控制着垂直混合强度, 从而影响着模式对降水预报的能力; 陈炯等<sup>[6]</sup>在研究 WRF 模式中是否使用 PBL 参数化方案对暴雨的模拟影响时, 发现使用 PBL 参数化方案对江淮暴雨的模拟结果更优; Hu 等<sup>[7]</sup>利用 WRF 模式对 3 种不同 PBL 参数化方案在美国休斯敦地区 7~9 月大气边界层的模拟中进行评估, 发现 MYJ 方案较之 YSU 的模拟误差更大, 且认为误差主要是由垂直混合强度与边界层上部不同程度的夹卷作用而引

起; Shin 等<sup>[8]</sup>对比研究了 WRF 模式中 5 种 PBL 参数化方案在晴空条件下的模拟结果, 发现不同 PBL 参数化方案在对物理量模拟时差异在夜间比白天小, 但其模拟误差更大。高笃鸣等<sup>[9]</sup>利用 WRF 模式中 3 种 PBL 参数化方案, 检验评估其对四川盆地夏季降水的模拟能力, 研究发现 MYJ 方案对各级降水模拟能力较弱, 其湍流混合作用较弱, 易产生虚假降水。

得益于高性能计算机, 数值天气预报模式与资料同化技术不断发展, 使用高分辨率数值模式来预报如暴雨等天气现象的发生发展随时空演变的能力不断提高。根据是否考虑格点及其周边格点对湍流通量的影响, 数值天气预报模式中现有的 PBL 参数化方案主要分为非局地闭合和局地闭合两种类型<sup>[10-14]</sup>。目前多数研究使用的数值模拟初始资料还不够精细, 且较少涉及局地混合与非局地混合的作用和影响。因此, 本文使用高分辨率数值天气预报模式(水平分辨率 9 km)研究了不同 PBL 参数化方案局地与非局地混合对边界层结构和降水模拟的影响。

## 1 试验设计与 PBL 参数化方案简介

### 1.1 PBL 参数化方案简介

采用了如下 PBL 参数化方案:

(1) Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) 方案<sup>[15]</sup>: 作为一

收稿日期: 2019-03-28

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(41505087); 国家自然科学基金面上资助项目(41575101); 国家自然科学基金资助项目(91537214); 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1505702)

种局地闭合方案,它采用 Mellor 等<sup>[16]</sup>的方法将近地层以上的湍流用 2.5 级湍流闭合来表示,通过湍流动能(turbulent kinetic energy, TKE)来计算湍流扩散系数,其计算方程为

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

方程中  $e$  是湍流动能,  $\beta$  是浮力系数,  $\varepsilon$  是耗散作用。将 MYJ 方案中 TKE 廓线的湍流动能  $e$  下降到临界值  $0.001 \text{ m}^2/\text{s}^2$  的高度定义为其边界层高度(PBLH)。

(2) Yonsei University (YSU) 方案<sup>[17]</sup>: 作为一种非局地闭合方案,它将于边界层顶的夹卷通量以显式形式表示为  $\overline{(w'c')}_h (\frac{z}{h})^3$ ,  $\overline{(w'c')}_h$  是逆温层通量。湍流量中考虑了非局地的反梯度输送项以及逆温层中由卷夹作用造成的热量交换,扩散方程写为

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

方程中  $C$  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,  $\gamma_c$  为反梯度通量,即非局地梯度引起的通量输送,  $\gamma_c = b \frac{\overline{(w'c')}_0}{w_{*0}h}$ 。YSU 方案考虑了动量

的非局地混合,边界层速度尺度  $w_s = (u_*^3 + \varphi_m k w_{*b}^3 / h)^{1/3}$ , 其中  $u_*$  为地表摩擦速度,  $\varphi_m$  为风廓线函数,  $k$  为卡曼常数,  $w_{*b}$  为湿空气的对流速度尺度。为适应更为深厚的混合作用,YSU 方案使用理查逊数估算其边界层高度  $h$ , 理查逊数  $Ri_b = \frac{g(\theta_v(z) - \theta_s)_z}{\theta_{va} U^2(z)}$ , 其中  $\theta_v(z)$  为  $z$  高度的虚位温,  $U(z)$  为  $z$  高度的水平风速,  $\theta_s$  为近地面层虚位温,  $\theta_{va}$  为模式底层虚位温,  $\theta_s = \theta_{va} + \theta_T$ ,  $\theta_T$  为地表与模式底层的相当位温差异,当  $Ri_b = Ri_{crit}$  (临界理查逊数)时对应的高度  $z$  即为边界层高度  $h$ , 且  $Ri_{crit}$  在不稳定层结中为 0, 稳定层结中为 0.25。

(3) YSU-2 方案: 为研究非局地混合项在模式中所起到的具体作用,将 YSU 方案扩散方程式(2)中的反梯度通量项  $\gamma_c = b \frac{\overline{(w'c')}_0}{w_{*0}h}$  与夹卷通量项  $\overline{(w'c')}_h (\frac{z}{h})^3$  均设为 0, 使得在该方案中仅包含局地混合作用,其边界层高度的计算方法与 YSU 方案相同。

## 1.2 数值模拟试验方案设计

使用华东区域中尺度数值预报系统——WARMs 2.0 对两次暴雨过程个例进行研究,分析不同 PBL 参数化方案局地混合和非局地混合在高分辨率数值预报中的作用和影响。WARMs 2.0 具有非绝热初始技术,主要靠复杂云分析模块实现,通过同化探空、地面气象

站、雷达和卫星等观测资料之后得到模式的初始场与侧边界条件。模式水平分辨率为 9 km, 东西向和南北向的格点数分别为 760 和 600, 文中华东区域的范围划定为:  $21^\circ\text{N} \sim 43^\circ\text{N}$ ,  $105^\circ\text{E} \sim 130^\circ\text{E}$ 。垂直方向分为 51 层, 模式最高层顶为 30 hPa, 积分时间步长 45 s。

其中个例 1 为 2013 年 9 月中旬上海及周边地区的一次雷暴后向传播并伴随强降水的过程<sup>[18]</sup>, 模拟时段为 2013 年 9 月 12 日 20 时至 15 日 20 时(北京时 BC = UTC+8, 下同)。个例 2 为 2015 年 8 月下旬一次台风外围雨带影响上海及周边地区的强降水过程<sup>[19]</sup>, 模拟时段为 2015 年 8 月 23 日 08 时至 26 日 08 时。

除 PBL 参数化方案以外,使用的物理参数化方案还有: Tomsom 冰雹微物理过程方案, rrtmg 长波辐射方案, rrtmg 短波辐射方案, Noah 陆面过程方案, 不使用积云参数化方案和城市物理方案。

研究对两个个例分别进行了 4 组不同 PBL 参数化方案的对比试验: (1) MYJ——使用 MYJ 参数化方案对个例进行模拟; (2) YSU——使用 YSU 参数化方案; (3) YSU-2——使用前文所设的 YSU-2 参数化方案; (4) NOPBL——不使用 PBL 参数化方案, 作为前 3 组试验中边界层次网格输送作用的空白对照试验。

## 2 结果分析

### 2.1 PBL 参数化方案对边界层结构的影响

边界层的热力与动力结构可以通过其气象要素的垂直分布很好地表现出来, 各 PBL 参数化方案的使用在不同下垫面条件与天气条件下产生的影响也有所差别。

#### 2.1.1 边界层中物理量的垂直廓线

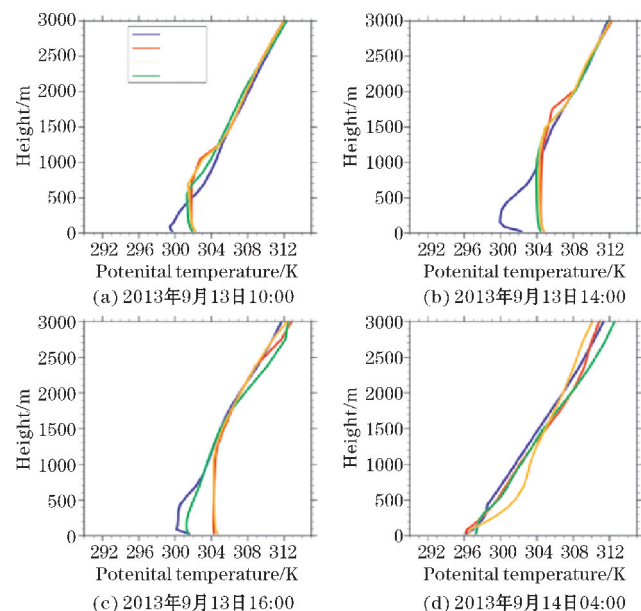


图1 个例1 徐家汇站点各方案不同时刻的位温廓线



图1是个例1中主要降水区域上海徐家汇站点几种PBL参数化方案在不同时刻位温的垂直廓线图。图1(a)为2013年9月13日10时,当模式使用MYJ方案时0~600 m存在有不稳定层结,600 m以上位温随高度增加,为稳定层;使用YSU方案后的混合层高度约1100 m比非局地输送项设为0后的YSU-2方案更高,YSU-2方案则约700 m,说明YSU中的非局地项对湍流混合作用更明显;未使用PBL参数化方案时,模拟结果总体显示为比较稳定的层结,边界层内湍流混合难以发展,未能模拟出明显的混合层。14时(图1b)所有使用了PBL参数化方案模拟出的混合作用均达到一天中最强,这是由于随着太阳辐射增强,下垫面加热大气使浮力增加,导致边界层的湍流混合作用最大。混合层的高度较前时刻有明显的增加,MYJ与YSU-2方案接近1500 m,混合层高度最高达约1800 m出现在使用非局地闭合的YSU方案,而未使用PBL参数化方案时所模拟出的位温廓线在边界层近地面200 m以内呈现出稳定层结,以上则为稳定。16时(图1c)边界层混合作用开始减弱,YSU和YSU-2方案模拟出的混合层高度约为1200 m,且模拟位温高于其他方案,而MYJ方案则迅速稳定,说明其模拟的混合作用时间更短,未使用PBL参数化方案时0~100 m以内依然存在明显的逆温层,100~400 m为中性层。综上3个时刻得出,在白天由于各PBL参数化方案对湍流混合作用的模拟能力不同,模式能够不同程度地模拟出边界层中不同层结特征:在对流不稳定层结上,模拟出的位温与混合层高度最高、湍流作用最明显、持续时间最长的方案为非局地闭合的YSU方案,而局地闭合MYJ方案对不稳定层结模拟的时间更短;未使用PBL参数化方案时,模式未能明显模拟出边界层中的湍流混合作用,无法反映出实际的混合层高度,原因在于此时模式中缺少次网格的垂直混合,低层热量难以向上层大气输送。14日04时(图1d)各方案均能模拟出夜间位温廓线的逆温层结,YSU-2方案模拟出的逆温层结较强于YSU方案,这可能是由于缺少非局地混合项而导致。

图2是个例2中徐家汇站点几种PBL参数化方案在不同时刻位温的垂直廓线图。由2015年8月24日10时位温廓线(图2a)可看出,使用MYJ方案时0~300 m左右呈中性层结,中性层上部为稳定层;使用YSU方案时0~300 m表现为弱中性层结,YSU-2方案模拟出的混合层高度略低于YSU、MYJ方案,1000 m以下YSU方案模拟出的位温最高,MYJ和YSU-2方案与YSU方案相比都有不同程度的冷偏差;边界层在模式关闭PBL参数化方案时为稳定层结。14时(图2b)边界层混合作用增强,在3种PBL参数化方案中,局

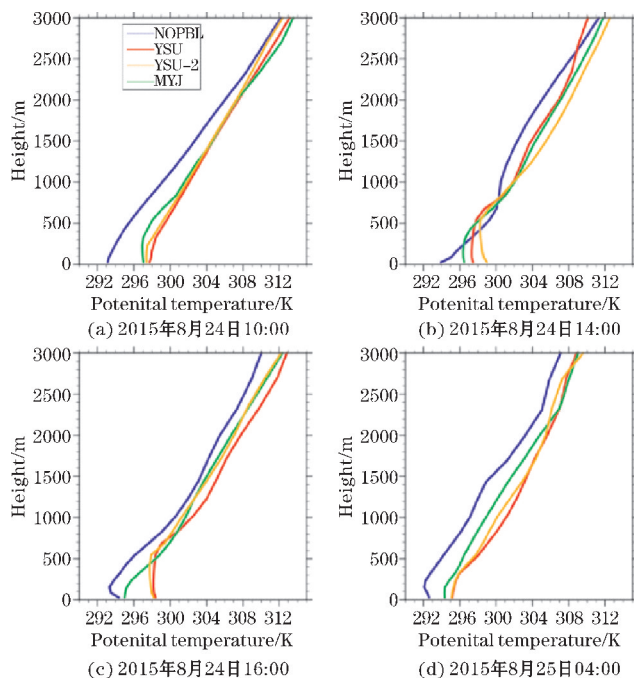


图2 个例2 徐家汇站点各方案不同时刻的位温廓线

地闭合MYJ方案模拟出的混合作用最弱,混合层高度约为300 m,位温也低于另外两种方案;模拟出的混合作用最强,混合层高度约700 m为非局地闭合的YSU方案;YSU-2在600 m以下有不稳定层结;模式在未使用PBL参数化方案时依然没有模拟出混合作用。16时(图2c)边界层的混合作用开始减弱,MYJ方案迅速变为稳定状态,YSU方案模拟出的位温比YSU-2方案高,混合层高度也更高,说明YSU方案中的非局地输送项在对降水过程模拟时会促进湍流混合作用。25日04时(图2d)各方案的模拟结果均显示出夜间逆温层,模式使用YSU方案时位温最高,其与别的方案相比均有不同程度的热偏差。总的来说个例2与个例1所得结论基本类似,非局地闭合方案所模拟出的边界层湍流混合作用总是最强,白天的混合高度与位温值最高,而夜间稳定层的位温也高于其他方案。

边界层中的水汽含量也可以表征出其中的湍流混合强度。图3是个例1中徐家汇站点各PBL参数化方案在不同时刻水汽混合比的垂直廓线图。图3(a)中2013年9月13日10时,YSU与YSU-2方案模拟的水汽混合比值在1000 m以下随高度的变化很小,水汽向上的输送强,二者的值在边界层中下部也略低于局地闭合MYJ方案,说明地面水汽能够输送到边界层上部更高的位置,低层空气失去的水汽更多,模拟出的湍流混合作用更强;而模式未使用PBL参数化方案时,未能较好地模拟出水汽向上的垂直输送,其水汽混合比整体随高度减小。14时(图3b)随着降水过程的开始,地面水汽向上蒸发,YSU方案模拟出的水汽混合比值在边界层下部最低,垂直结构也最明显,主要是因

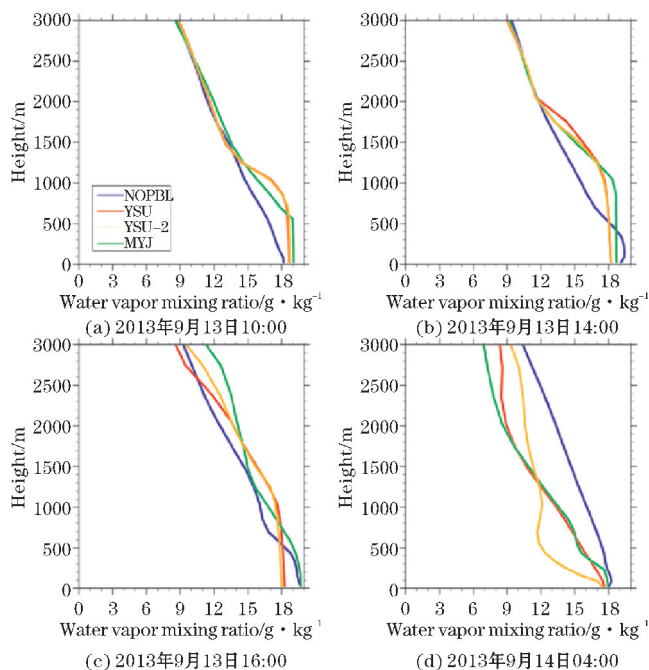


图3 个例1 徐家汇站点各方案不同时刻的水汽混合比廓线

为非局地方案较强的垂直混合会引起较强的夹卷作用,使得低层水汽能够向上输送至更高;未使用 PBL 参数化方案时,边界层贴地层有水汽随高度增加的弱不稳定结构,水汽混合比值也高于使用 PBL 参数化方案后的模拟结果,说明其湍流混合过程难以发展,水汽难以向上输送。16 时(图 3c)与上一时刻的基本趋势一致,随着降水的增强,MYJ 方案的低层水汽增加,其水汽混合比值高于 YSU 与 YSU-2 方案,垂直结构也有所减弱,说明在强降水的过程中,局地闭合方案水汽由下向上的传输作用弱于非局地闭合方案。14 日 04 时(图 3d),夜间各方案模拟出的水汽混合比廓线均表现出稳定,500 m 以下 YSU-2 方案比值随高度增加减少明显,且值最小;MYJ 方案在贴地层的水汽略高于 YSU 方案;水汽含量最多的是未使用 PBL 参数化方案时。个例 2 的垂直水汽混合比廓线与个例 1 所得结论也有着相似特征。

两个个例中徐家汇站点各 PBL 参数化方案在不同时刻的  $u$  方向风速廓线(图略)白天模拟的结果均体现出边界层内非局地混合 YSU 方案明显的湍流混合作用,使得动量的向下输送较强;局地闭合方案由于其较弱的湍流混合作用,动量的由上往下传输强度低于非局地闭合方案;未使用 PBL 参数化方案时,模拟出的风速在边界层中下层随高度变化的波动较大,说明动量难以由上往下传输。边界层中各方案模拟的  $u$  方向风速廓线在夜间存有较大波动,个例 1 中除未使用 PBL 参数化方案外,其余 3 个方案均模拟出了 200 m 以下近地层风速随高度的快速增加,其中 YSU 方案  $u$  分量上的风切变最大,近地层 300 m 处西风风速

也大于 YSU-2 方案,说明在夜间湍流作用最强的是非局地闭合 YSU 方案,其在垂直方向上对动、热量及水汽的输送能力也最强。

### 2.1.2 边界层高度与地面 2 m 温度随时间的变化

边界层高度(PBLH)对边界层结构特征的体现也很重要,文中根据所使用的 PBL 参数化方案的不同采用了对应的 PBLH 算法。图 4 展示了不同区域使用 YSU、YSU-2 和 MYJ 3 种 PBL 参数化方案对个例 1 模拟得到的边界层高度随时间的变化。由图可知,模式在陆地区域(图 5a-c)均模拟出了 PBLH 较强的日变化,白天由于地表接收太阳短波辐射热通量大使其边界层内的湍流混合运动较强,对应的 PBLH 也发展较高;反之夜间湍流运动较弱,所以对应时刻的 PBLH 也较低。MYJ 方案与 YSU 和 YSU-2 方案的模拟差异较大,且 PBLH 值的震荡较强。对降水区域(图 4a)的模拟结果显示,YSU 和 YSU-2 方案的在 3 个白天与夜间的 PBLH 变化比较一致,MYJ 方案则在第 2 个白天 PBLH 较高,在 14 日 14 时达到了近 2200 m,对应该时刻的位温廓线也有较深厚的混合层,其原因可能是由于各方案之间不同的 PBLH 算法所导致,而 14 日 22 时至 15 日 05 时的夜间时段 MYJ 方案的 PBLH 最低,不足 100 m。华北地区(图 4b)整体而言,3 种方案模拟出的 PBLH 在第 2 个白天较高,对应时间位温廓线的混合层也较高。高原地区(图 4c)YSU 方案的 PBLH 在多数时间都较 YSU-2 和 MYJ 方案略高。海上区域(图 4d)由于下垫面的热力特性,PBLH 无明显日变化,YSU 和 YSU-2 方案较 MYJ 方案模拟值波动略小,YSU 方案模拟出的 PBLH 也最高,且 MYJ 方案的 PBLH 在多数时候很低,不足 100 m。

个例 2 模拟得到的 PBLH 随时间的变化(图略)与个例 1 结果保持一致,几个方案在陆地区域均能表现出 PBLH 的明显日变化,强降水时 PBLH 较其他区域更低,而海上区域的 PBLH 随时间的日变化不明显。非局地混合 YSU 方案的 PBLH 通常为最高。

图 5 是在不同区域使用各 PBL 参数化方案对个例 1 模拟得到的地面 2 m 温度( $T_2$ )随时间的变化。陆地区域对  $T_2$  的模拟也有明显的日变化特征,白天温度较高,夜间降低。对降水区域(图 5a)的模拟显示,各方案模拟出的  $T_2$  值波动大于别的区域,YSU 方案的模拟值要大于 YSU-2 和 MYJ 方案,未使用 PBL 参数化方案时  $T_2$  有随模拟时间逐渐减小的趋势。华北地区(图 5b)YSU 与 YSU-2 方案的  $T_2$  模拟差异不大,夜间 YSU 方案略有偏高,MYJ 方案模拟的  $T_2$  值则与前两种方案相比偏低更明显,未使用参数化方案时的  $T_2$  变化不明显。高原地区(图 5c)YSU 方案模拟的  $T_2$  值略

高于 YSU-2 方案,而未使用参数化方案时在白天的温度值比另外 3 种方案低 5 ℃ ~ 6 ℃。海上区域(图 5d)的 T2 由于下垫面的不同无明显日变化,整体而言

YSU 方案的模拟温度略高于 YSU-2 和 MYJ 方案,未使用参数化方案时的 T2 最低。

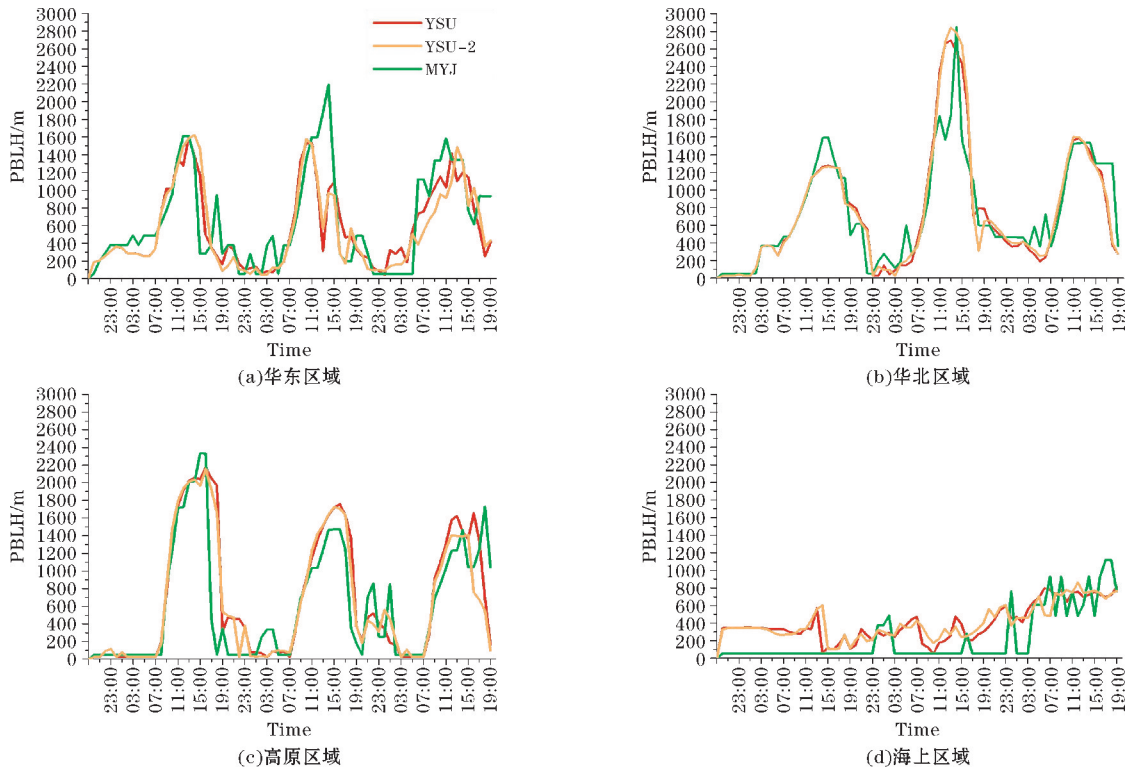


图 4 个例 1 边界层高度在不同区域的时序图

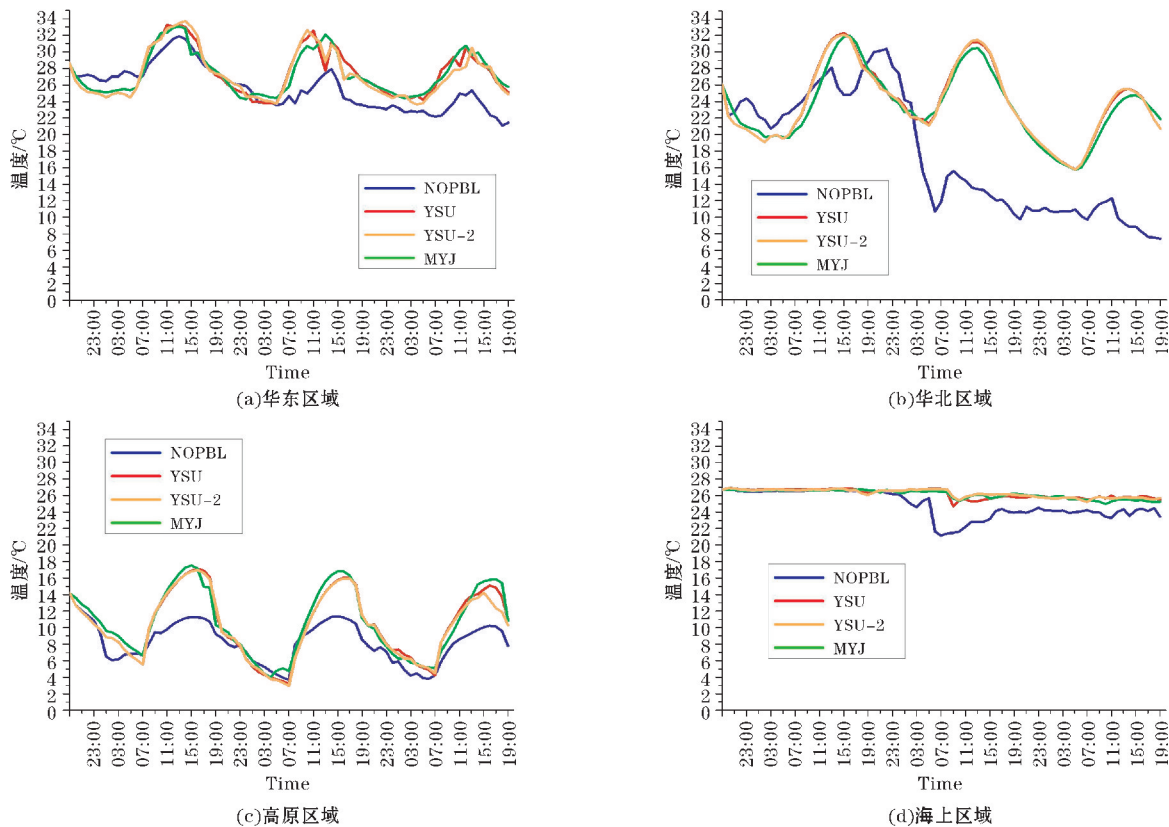


图 5 个例 1 地面 2 m 温度在不同区域的时序图



个例 2 模拟得到的 T2 随时间的变化(图略)也与个例 1 结果大致相似,模式使用 PBL 参数化方案后在陆地区域均能表现出 T2 的日变化,非局地 YSU 方案的 T2 通常较局地混合方案略高,未使用方案时模拟值较低。海上区域的 T2 均无明显日变化。

2.2 PBL 参数化方案对降水的影响

2.2.1 降水空间分布分析

图 6 为个例 1 主要降水的华东区域在 2013 年 9 月 12 日 20 时至 13 日 20 时内 24 h 累计降水空间分布图。3 种使用了 PBL 参数化方案的模拟降水落区基本相符,MYJ 方案的降水范围在 4 mm 以下的降水比 YSU 和 YSU-2 方案大,而 60 mm 以上较小。YSU 和 YSU-2

方案之间的模拟差异在陆地较小,而海上的差异较为明显,其原因可能是由于下垫面性质的不同而导致的。YSU 方案模拟出的降水区域及强度均略大于 YSU-2 方案,陆地上的差异主要集中在一些降水大值区。与 YSU-2 方案相比,YSU 方案在对降水较强的上海及周边地区模拟时的强降水范围更大、强度更强,这说明非局地闭合方案在对强降水过程进行模拟时的湍流作用更强,更容易反映出低层热量和水汽进入高层大气形成更多降水的过程。未使用 PBL 参数化方案时,由于其降水仅由高空平流等过程带来,失去水汽通过湍流混合作用由下向上输送的过程,所以其模拟降水强度弱、范围小。

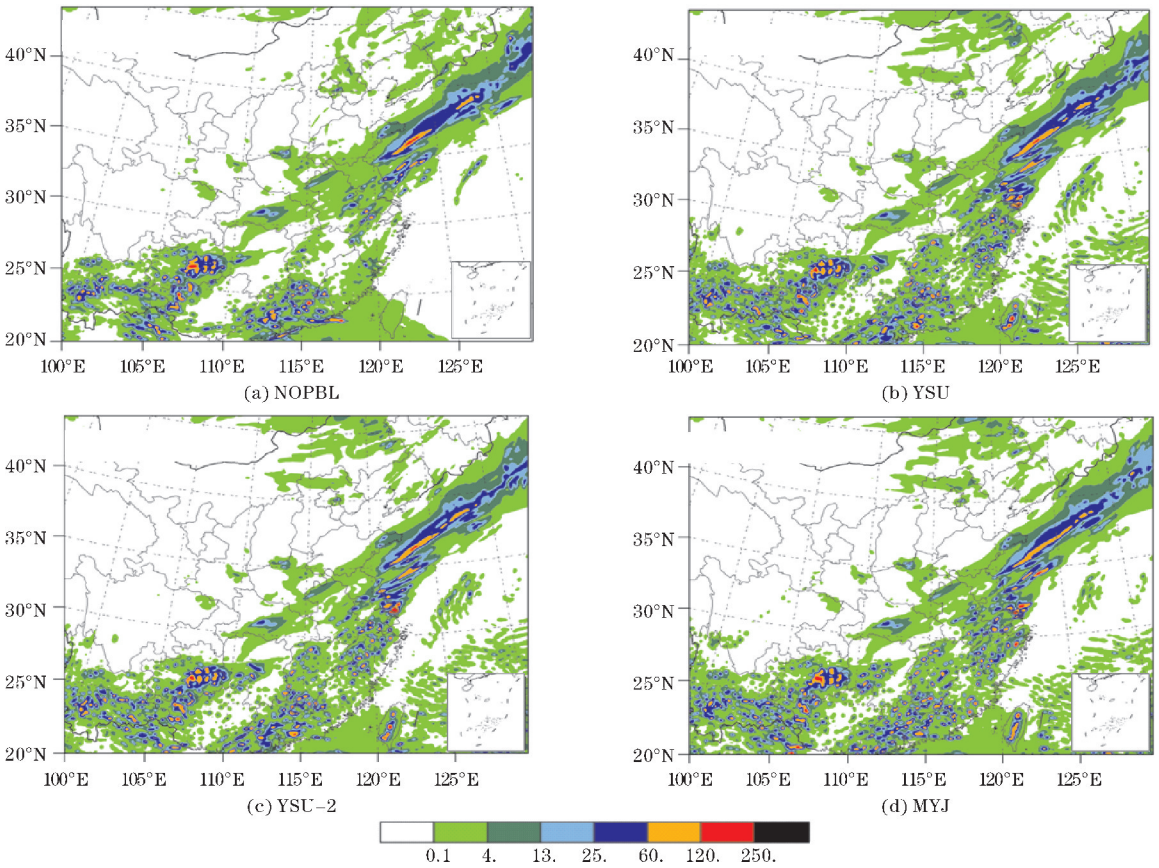


图 6 2013 年 9 月 12 日 20 时-13 日 20 时华东区域 24 h 累计降水空间分布图

图 7 为个例 2 主要降水的华东区域在 2015 年 8 月 23 日 08 时至 24 日 08 时之间 24 h 累计降水空间分布图。与个例 1 模拟结果类似,由图 7 看出中国东部洋面上的台风雨带结构在 3 种 PBL 参数化方案的模拟下均得到了较好的重现,MYJ 方案的降水范围在 13 mm 以下比 YSU 和 YSU-2 方案大,120 mm 以上明显较小。YSU 方案对台风雨带结构特征的模拟最为明

显,降水强度和强降水区域的范围均最大。MYJ 方案模拟出的降水强度比 YSU 方案弱。未使用 PBL 参数化方案时模式未能模拟出台风雨带结构及强降水区域。总之,由于非局地混合作用对湍流垂直运动更好的体现能力,使得模拟的结果降水强度更强,强降水范围更广。

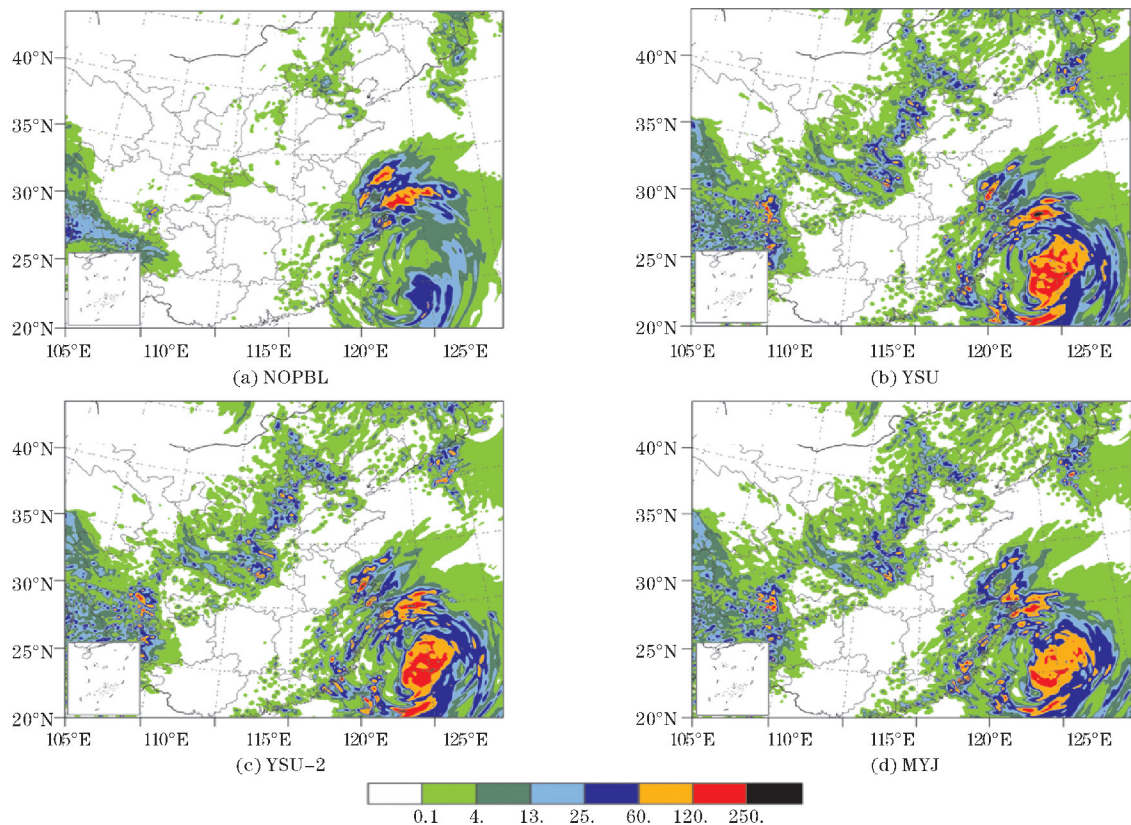


图 7 2015 年 8 月 23 日 08 时-24 日 08 时华东区域 24 h 累计降水空间分布图

2.2.2 降水频数分析

图 8 为个例 1 每 24 h 全区域不同降水量级的频数分布图,能反映出各参数化方案对不同量级降水效率模拟的情况,其中 24 h 累计降水量 ( $R$ ) 量级的划分标

准为:小雨—— $0.1 R < 10\text{ mm}$ ;中雨—— $10 R < 25\text{ mm}$ ;大雨—— $25 R < 50\text{ mm}$ ;暴雨—— $50 R < 100\text{ mm}$ ;大暴雨及以上—— $R > 100\text{ mm}$ 。

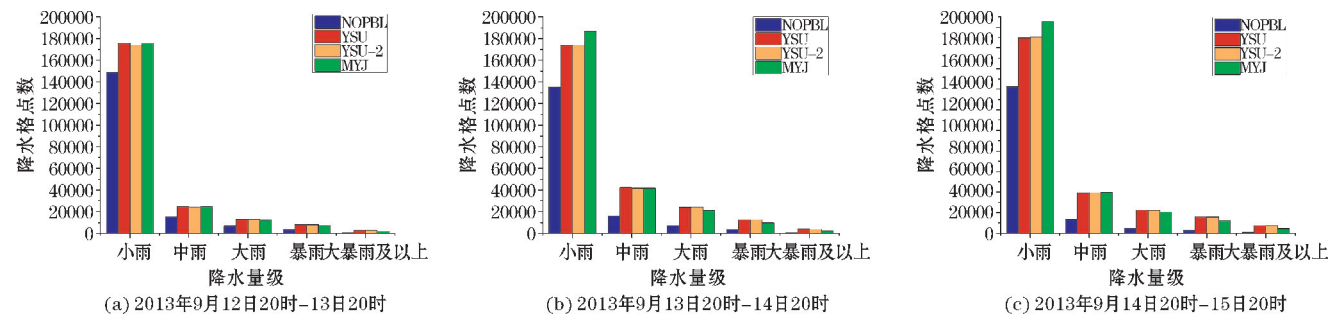


图 8 个例 1 每 24 h 不同量级降水频数图

由图 8 可见,各个时次对小雨的模拟频数较高,量级越大频数则依次降低。YSU 方案与 YSU-2 方案的模拟结果整体比较相近,YSU 方案频数略高,特别是对大雨及以上量级的模拟在所有方案中频数最高,反映出 YSU 方案对大雨及以上量级降水的模拟降水效率更高,这是因为非局地闭合方案增加了大涡输送项与边界层顶和自由大气之间的夹卷通量项,使湍流混合作用在边界层中更明显,因此更容易模拟出较大量级的降水,这与前文分析边界层结构时所得的结论也比较符合。局地混合 MYJ 方案对小雨的模拟降水效

率更高。未使用 PBL 参数化方案时,对不同时段不同量级降水的模拟频数均大幅低于另 3 个方案。

图 9 为个例 2 每 24 h 全区域不同降水量级的频数分布图。由图 9 可见,个例 2 与个例 1 的模拟结果类似,也表现出小雨出现的频数较高,往后量级越大频数则依次降低。非局地混合 YSU 方案对大雨及以上量级降水效率的模拟在所有方案中最高,局地混合 MYJ 方案对小、中雨降水效率的模拟与其他几个方案相比较高。



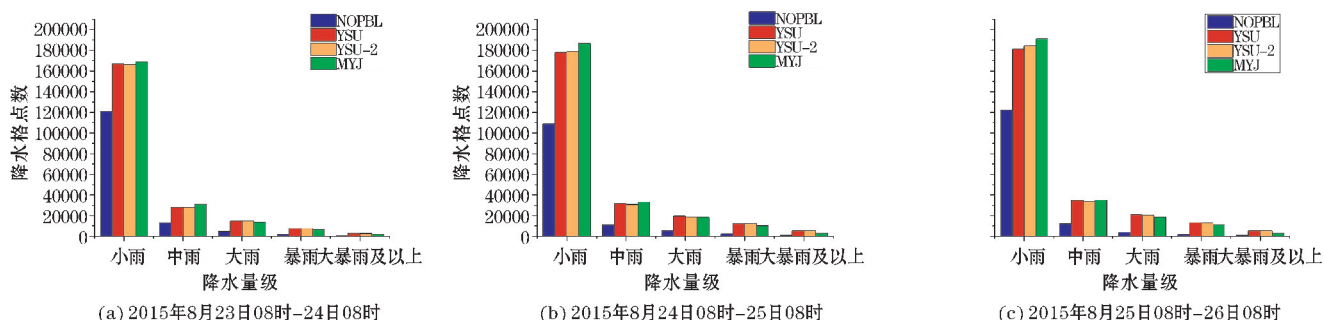


图9 个例2 每24 h不同量级降水频数图

### 3 结论

使用 WARMS 2.0, 分析不同 PBL 参数化方案及局地闭合和非局地闭合在高分辨率数值天气预报模式中对两次暴雨过程模拟的作用及影响, 得出结论如下:

(1) 由边界层物理量垂直廓线来看, 非局地闭合 YSU 参数化方案所模拟出的边界层垂直湍流混合作用最强, 混合层深厚, 其中动、热能和水汽的垂直输送也最强; 关闭非局地项的 YSU-2 参数化方案的边界层垂直湍流混合作用略弱于非局地闭合的 YSU 方案, 但强于局地闭合参数化方案 MYJ; 局地闭合 MYJ 参数化方案的边界层垂直湍流混合作用较弱, 其位温垂直廓线在白天多呈现出不稳定状态; 而不使用 PBL 参数化方案时湍流混合则难以发展。

(2) 由边界层高度与地面 2 m 温度随时间的变化来看, 各方案在陆地地区均有较为显著的日变化, 使用了 PBL 参数化方案后近地层物理量的日变化较未使用 PBL 参数化方案时更加明显, 非局地闭合 YSU 方案的边界层高度和地面 2 m 温度略高于关闭非局地项的 YSU-2 参数化方案以及局地闭合的 MYJ 参数化方案, 且 MYJ 案模拟的结果振荡明显; 海洋区域由于其下垫面的性质, 各方案均无明显日变化存在。

(3) 由华东地区 24 h 累计降水空间分布来看, 非局地闭合 YSU 方案由于湍流混合作用最强, 更能反映出低层热量和水汽进入高层大气后产生更多降水的过程, 从而模拟的降水强度更强、强降水范围更大, 台风雨带结构最为明显; 关闭非局地项的 YSU-2 参数化方案于带分布以及降水范围和强度在陆地上大致和 YSU 方案相似, 但在海上明显弱于 YSU 方案; 局地闭合 MYJ 参数化方案的降水较少, 雨带范围缩小; 模式关闭 PBL 参数化方案后产生的降水最少, 水汽无法通过湍流混合作用在垂直方向上往上输送。

(4) 不同降水量级的频数分布反映出非局地闭合 YSU 方案对大雨及以上量级的降水效率影响较大, 说明在强降水天气过程中其湍流混合作用较强, 模拟出

的大量级降水发生频次较高; 局地闭合 MYJ 方案对少量级的降水效率影响较大, 其模拟出的小雨发生频次较高。关闭非局地项的 YSU-2 参数化方案对各量级降水的模拟能力大致与 YSU 方案相仿, 但在大量级降水方面略弱于 YSU 方案。

### 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: 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] 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.
- [6] 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.
- [7] Hu X M, Nielsengammon J W, Zhang F. Evaluation of Three Planetary Boundary Layer Schemes in the WRF Model [J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2010, 49 (9): 1831-1844.
- [8] Shin H H, Hong S Y. Intercomparison of Planetary Boundary-Layer Parametrizations in the WRF Model for a Single Day from CASES-99 [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2011, 139 (2): 261-281.
- [9] 高笃鸣, 李跃清, 蒋兴文, 等. WRF 模式多种边界层参数化方案对四川盆地不同量级降水影响的数值试验 [J]. 大气科学, 2016, 40 (2): 371-389.
- [10] Troen I B, Mahrt L. A simple model of the atmos-



- pheric boundary layer; sensitivity to surface evaporation [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, 37(1):129–148.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [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] 孙敏, 戴建华, 袁招洪, 等. 双多普勒雷达风场反演对一次后向传播雷暴过程的分析 [J]. *气象学报*, 2015, 73(2):247–262.
- [19] 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.

## Effects of the Local and Nonlocal Mixing of Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes in a High Resolution Numerical Forecast Model

DAI Xinlu<sup>1</sup>, CHEN Baode<sup>2,3</sup>, ZHANG Xu<sup>2,3</sup>, FAN Guangzhou<sup>4</sup>

(1. Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072, 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; 4. 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)

**Abstract:** In order to study the effects of local and non-local mixing of different planetary boundary layer parameterization schemes in high resolution numerical forecast model, this work simulated two cases of heavy rainfall processes based on WRF ADAS Real-time Modeling System 2.0. By comparing and analyzing the physical quantities in the simulation results, the main conclusions are as follows: (1) The stronger the non-local effect of the parameterization scheme, the stronger the vertical turbulent mixing effect of the simulated boundary layer, also the mixing layer much deeper. The vertical transport of kinetic energy, thermal energy and water vapor is also stronger, and the vertical profile of the potential temperature is more stable during the day. (2) The stronger turbulent mixing during heavy rainfall in nonlocal mixing made contribution to more precipitation. Nonlocal mixing had the strong effect on precipitation efficiency of heavy rain, while the local mixing had more influence on the light precipitation. (3) The near surface variables showed an obvious diurnal cycle after using the boundary layer parameterization schemes. When the planetary boundary layer parameterization scheme was turned off, the water vapor could not be transported vertically by turbulent mixing, hence less precipitation was produced. The diurnal cycle of near surface variable was not found in the marine area.

**Keywords:** meteorology; numerical weather forecast; planetary boundary layer parameterization scheme; local mixing; non-local mixing; high resolution numerical forecasting model