

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12021.
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.

长江下游地区不同边界层参数化方案的试验研究

徐慧燕^{1,2} 朱业^{1,3} 刘瑞¹ 沈杭锋^{1,4} 王东海² 翟国庆¹

1 浙江大学地球科学系, 杭州 310027

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 浙江省海洋监测预报中心, 杭州 310007

4 浙江省杭州市气象局, 杭州 310007

摘 要 利用中尺度数值模式 WRFV3.1.1 中的 MYJ、QNSE、YSU、ACM2、MYNN2.5、MYNN3、BouLac 七种不同边界层参数化方案, 进行了发生在长江下游地区的 3 例暴雨的模拟试验。重点分析比较了七个不同边界层参数化方案对降水总量分布、次降水区的边界层结构、关键基本气象要素场的模拟能力, 并将降水总量和关键基本气象要素场的模拟结果与实测结果进行了统计检验。通过对比, 发现 QNSE 方案的模拟能力相对优于其他边界层参数化方案。

关键词 边界层参数化方案 WRF 模式 降水 Ts 评分

文章编号 1006-9895(2013)01-0149-11

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12021

Simulation Experiments with Different Planetary Boundary Layer Schemes in the Lower Reaches of the Yangtze River

XU Huiyan^{1,2}, ZHU Ye^{1,3}, LIU Rui¹, SHEN Hangfeng^{1,4}, WANG Donghai², and ZHAI Guoqing¹

1 Department of Earth Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Marine Monitoring and Forecasting Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310007

4 Hangzhou Meteorological Bureau, Zhejiang Province, Hangzhou 310007

Abstract By using several planetary boundary layer schemes (Mellor–Yamada–Janjic; quasi-normal scale elimination; Yonsei University; asymmetric convective, version 2; Bougeault–Lacarrere (BouLac); Mellor–Yamada–Nakanishi–Niino, level 2.5; and Mellor–Yamada–Nakanishi–Niino, level 3) in a Weather Research and Forecasting (WRF) numerical model, seven sets of model simulations for three rainstorm cases in the lower reaches of the Yangtze River were performed. This paper thoroughly analyzes and compares the simulation ability of seven planetary boundary layer parameterizations with respect to the distribution of 24-hour total rainfall, boundary layer structure in the rainstorm area, fundamental fields of meteorological elements, and statistical test results for total rainfall. A comparison of the simulations and the observations indicated that the quasi-normal scale elimination planetary boundary layer scheme is superior to the other six.

收稿日期 2012-02-16, 2012-06-19 修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41175047, 国家公益性行业科研专项 GYHY201006014、GYHY201006007

作者简介 徐慧燕, 女, 1988 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为中尺度数值模拟。E-mail: 21006264@zju.edu.cn

通讯作者 翟国庆, E-mail: zhaigq@zju.edu.cn

Keywords Planetary boundary layer parameterizations, WRF model, Precipitation, TS verification

1 引言

WRF (Weather Research and Forecasting) 模式是新一代中尺度数值模式, 自它 2000 年诞生以来的短短十多年时间, 该模式在科研与业务上得到了广泛的应用, 并不断更新发展。模式更新过程中主要的改进内容之一是: 考虑了更加细致和更为复杂的物理过程, 其中包括行星边界层的物理过程。行星边界层是直接受下垫面影响, 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 (Stull, 1991)。它对于地气间动量、热量和水汽的交换有十分重要的作用, 而这种作用主要是通过边界层湍流运动得以实现。尽管计算机技术突飞猛进, 但当前模式仍然难以分辨次网格尺度的湍流运动, 需要通过边界层参数化方法加以描述。

边界层参数化方案在数值模拟中有着重要的作用。Zhang and Zhang (2004) 利用 MM5 进行边界层参数化方案的敏感性试验, 指出不同参数化方案对地表风场、温度场的模拟存在较大的差异, 其原因主要是: 不同边界层参数化方案对物理过程 (如垂直湍流交换) 的参数处理是不同的。陈炯和王建捷 (2006b) 利用 WRF 模式中不同边界层参数化方案模拟江淮暴雨, 表明降水对行星边界层物理过程非常敏感。对于不同地区边界层参数化方案敏感程度有所区别。Hu et al. (2010) 通过对美国夏季东南部地区三个月的模拟对比了 WRF 模式中的 MYJ、YSU 与 ACM2 边界层参数化方案, 发现局地闭合的 MYJ 方案模拟的温度与湿度偏差最大。王颖等 (2010) 对兰州冬季地面温度与风速进行模拟, 结果表明对兰州冬季温度日变化的模拟, MYJ 方案优于 YSU 与 ACM2 方案。对于中国西北地区, MYJ 方案可能有相对优势。慕建利 (2009) 运用 WRF 模式中的 MYJ 方案成功模拟了 2007 年 8 月 8~9 日发生在陕西中西部的中尺度对流系统引发的强暴雨。陈炯和王建捷 (2006a) 通过对北京大气边界层结构的模拟对比试验指出 MYJ 方案模拟结果优于 YSU 方案。王寅钧 (2011) 通过对青藏高原东南部模拟表明, 冬季稳定边界层的条件下, MYJ 方案模拟效果优于 YSU 方案。

虽然边界层参数化方案的试验已有不少, 但

对最近 WRF 模式的边界层参数的试验还有待深入, 由于长江下游地区是我国经济较发达和人口较稠密地区, 试验比较模式中的边界层参数优劣仍然十分重要。

目前数值模式中的边界层参数化处理方法通常有以下几种: 一种是总体参数化方案; 另一种是适用于边界层中无分层模式的地转输送定律 (陈炯和王建捷, 2006b); 另外还有以下几种处理方法, K 闭合模式: K 闭合模式运用了 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), WRF2.0 的边界层参数化 MRF (Medium Range Forecast) 参数化方案 (Hong and Pan, 1996) 与 WRF3.1.1 中 YSU (Yonsei University) 边界层参数化方案 (Hong and Pan, 1996; Hong et al., 2006) 采用的都是 K 闭合方案 (Wang et al., 2010)。湍流动能理论: 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。WRFV3.1.1 中的 MYJ (Mellor-Yamada-Janjic) 边界层参数化方案 (Janjić, 2002)、MYNN2.5 (Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 2.5) 边界层参数化方案 (Pagowski, 2008)、MYNN3 (Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 3) 边界层参数化方案 (Mellor and Yamada, 1982)、Bougeault-Lacarrere (Boulac) 边界层参数化方案 (Bougeault and Lacarrere, 1989) 采用的都是湍流动能闭合方案 (Wang et al., 2010)。Quasi-Normal Scale Elimination 边界层参数化方案在不稳定层结情况下也采用湍流动能闭合方案 (Sukoriansky et al., 2005; Sukoriansky, 2008)。过渡湍流理论: 按照物理空间透视法处理对象 (Stull, 1991)。原始非对称对流模式 (Pleim and Chang, 1992) 就是一个采用过渡湍流理论的简单过渡模式 (Pleim, 2006)。谱扩散理论: 假定扩散系数 K 随湍涡大小改变 (Berkowicz and Prahm, 1979; Berkowicz, 1984)。QNSE 边界层参数化方案在稳定层结下采用湍流谱闭合模式发展而来的 $K-\varepsilon$ 模式。 $K-\varepsilon$ 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, 比如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，考虑了湍流与波的共同作用。此外， $K-\varepsilon$ 模式描述了稳定层结下气流的一些重要特性。例如，Prandtl 数对 Froude 数与 Richardson 数的依赖，气流的各向异性及垂直扩散率的衰变等等。 $K-\varepsilon$ 模式基本原理是：假设在原始方程中，所有尺度是可分辨的，假设模式由一个基准态，则可以得到小尺度的扰动解，通过集合平均，将原始方程中的一小段尺度进行消除，这样能对粘性率与热量扩散率有个校正，然后对下一尺度重复此过程（Sukoriansky and Galperin, 2008）。在不稳定层结下，仍然采用 MYJ 方案的计算方法。可见，QNSE 边界层方案考虑了更为复杂、细致的物理过程。

2 模拟试验设置以及数据来源

本次模拟采用 $NCEP1^\circ\times1^\circ$ 再分析资料作为初始场，每 6 小时更换一次边界条件，同时模拟采用双向三重嵌套，试验中心位于（ $30^\circ N$, $110^\circ E$ ），水平格距分别为：45 km, 15 km, 5 km。其中 5 km 的区域包含了长江下游大部分地区，模拟区域具体设置如图 1 所示。分析时采用第二重的模拟结果。模式所有区域垂直层共 28 个 σ 层，模式所有区域的物理参数化方案包括：Dudhia 短波辐射方案，RRTM 长波辐射方案，WRF WSM5 云微物理参数化方案，热量扩散（Thermal diffusion scheme）陆面过程，GS 积云对流参数化方案。本文分别采用 MYJ、QNSE、YSU、ACM2、MYNN2.5、MYNN3、Boulac 共 7 个边界层参数化方案对长江下游地区的三次典型暴雨过程进行模拟，三个个例分别从初始时刻 2009 年 7 月 23 日 08:00（北京时间，下同）、2011 年 6 月 3 日 08:00、2011 年 6 月 13 日 20:00，模拟连续积分 36 小时，积分时间步长为 120 s，每一个积分时间步长均调用边界层方案，模拟方案具

体设计如表 1 所示。

3 边界层参数化模拟试验

3.1 降水模拟结果分析

3.1.1 降水模拟对比试验

图 2 为 2009 年 7 月 23 日 20:00~24 日 20:00 的 24 小时累计降水量的实况与 7 种不同边界层参数化方案的第二重模拟结果。实况 24 小时雨量呈东西带状分布在长江下游流域（图 2a），自西向东在安徽黄山与湖北通山一带分别存在 160 mm、100 mm 以上的 2 个强降水中心，分别称为 A、B 中心。从大尺度形势场上来看，7 种不同边界层参数化方案对海平面气压、850 hPa 高度场、流场，500 hPa 温度场与高度场的模拟大致相当，都能较好地反映主要的天气形势。从 24 小时降水的模拟结果来看，湍流动能类方案 [MYJ（图 2c）、MYNN2.5（图 2f）、MYNN3（图 2g）、QNSE（图 2b）、Boulac（图 2h）] 较好地反映出了降水区的南北宽度与东西走向，其中 QNSE（图 2b）方案与实况更接近；YSU（图 2d）

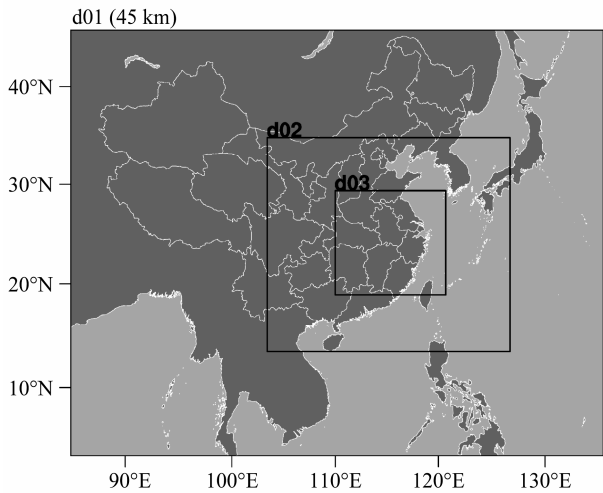


图 1 模拟区域设置
Fig. 1 Map of model domains

表 1 模拟试验方案设计
Table 1 A summary of different numerical experiments

试验方案	边界层参数化方案	地面层参数化方案
MYJ	Mellor-Yamada-Janjic 湍流动能方案	Monin-Obukhov(Janjic Eta)方案
QNSE	准正态尺度消除方案	准正态尺度消除方案
YSU	Yonsei University 参数化方案	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式	Pleim-Xiu 方案
MYNN2.5	Mellor-Yamada-Nakanishi and Niino 2.5 级方案	Mellor-Yamada-Nakanishi and Niino 方案
MYNN3	Mellor-Yamada-Nakanishi and Niino 3 级方案	Mellor-Yamada-Nakanishi 方案
Boulac	Bougeault-Lacarrere 参数化方案	Monin-Obukhov 方案

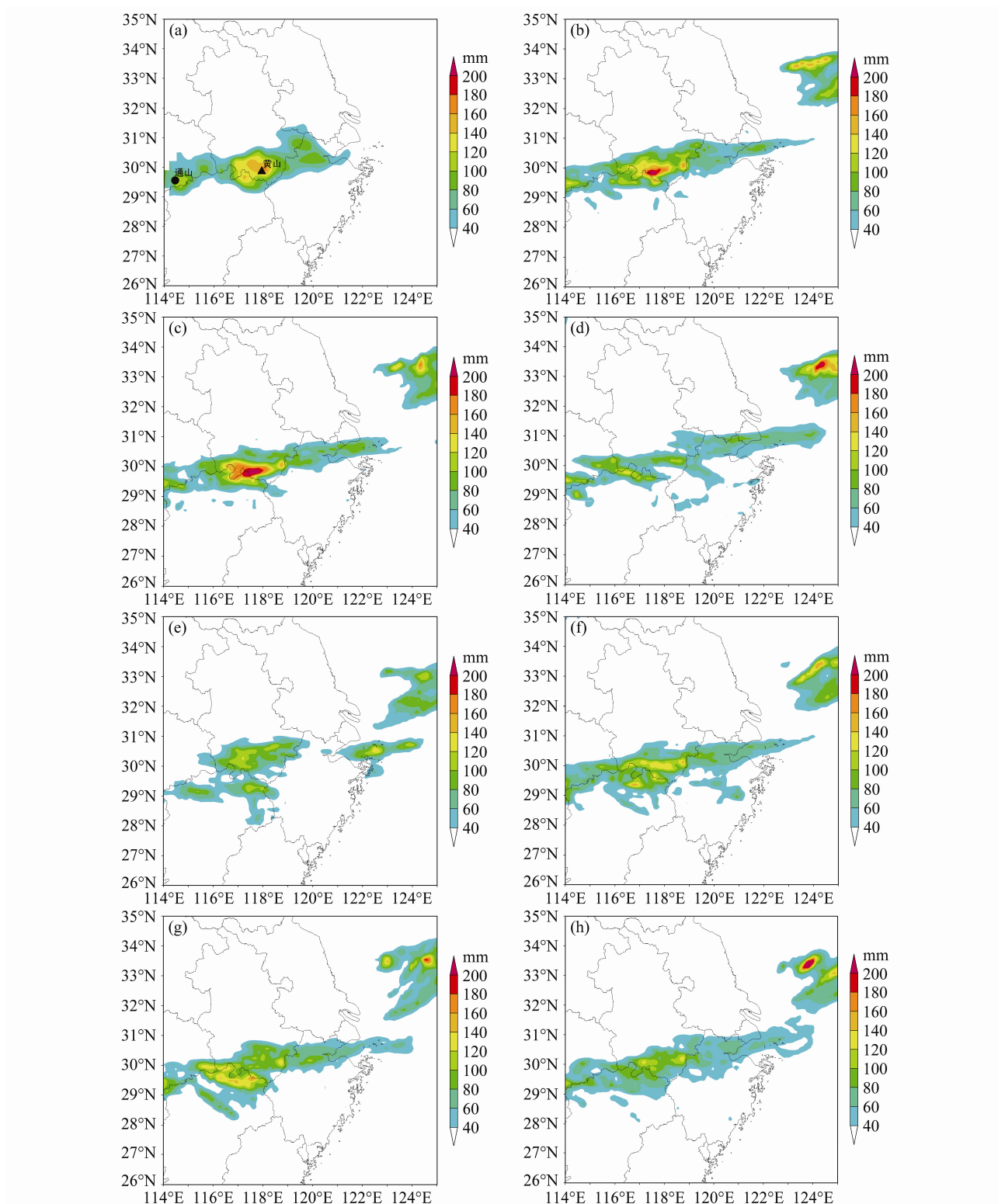


图2 2009年7月23日20:00~24日20:00不同边界层参数化方案的24h降水模拟结果与实况(单位:mm): (a) 实况降水; (b) QNSE; (c) MYJ; (d) YSU; (e) ACM2; (f) MYNN2.5; (g) MYNN3; (h) Boulac。●: 湖北咸宁市通山县; ▲: 安徽黄山市黟县

Fig. 2 24-hour accumulated precipitation with different planetary boundary layer schemes during 2000 LST 23 Jul–2000 LST 24 Jul, 2009: (a) Observed precipitation; (b) QNSE; (c) MYJ; (d) YSU; (e) ACM2; (f) MYNN2.5; (g) MYNN3; (h) Boulac. ●: Tongshan county of Xianning in Hubei Province; ▲: Yi county of Huangshan in Anhui Province

方案大致反映了降水区的东西走向，但没能反映出雨区的南北宽度；ACM2（图 2e）方案模拟的降水集中，没能反映出降水区的带状分布特征。与实况 24 h 累计降水量的 A、B 暴雨中心对比发现，不同边界层参数化方案试验还存在较大的差异。对实况 A 中心，只有 MYJ（图 2c）与 QNSE（图 2b）方案较好地模拟了中心的位置，但 MYJ（图 2c）模拟的强度偏强，QNSE（图 2b）比 MYJ（图 2c）减少了 20.2 mm，更接近实况，这可能得益于 QNSE 方案显式地区分了由层结引起的质量水平与垂直输送的差别。对实况 B 中心，QNSE（图 2b）方案模拟的强度与位置相对比较接近实况。

总体而言，就以上 7 种边界层方案，QNSE 方案相对是较优的。以相同的方法分别对 2011 年 6 月 3 日 20:00~4 日 20:00、2011 年 6 月 14 日 08:00~15 日 08:00 的 24 小时累计降水量的实况与 7 种不同边界层参数化方案的第二重模拟结果进行分析（图略），也得到了类似的结论。

通过以上不同边界层参数化方案的三次长江下游地区暴雨过程的试验比较，得到了定性较优边界层参数化方案，为了得到不同边界层参数化方案降水分布定量上的差异，还有必要进行降水模拟检验。

3.1.2 降水模拟检验

为了定量分析 7 种不同边界层参数化方案降水模拟结果的差异，将实况降水与模拟后插值到测站的预报值作统计检验。图 3 为 3 个个例降水检验的站点分布情况，样本站点分别涵盖了受 3 次降水影响的绝大多数地区，共计站点分别为 3342、5933、5742 个。本次统计检验采用 Ts 评分进行评定，将

降水等级划分为三个等级：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)，为简便起见，将这三个降水等级分别记为：[0.1, 0)、[50, 100)、[100, 200)。

Ts (threat score) 评分公式为：

$$Ts = \frac{N_a}{N_a + N_b + N_c}, \tag{1}$$

其中 N_a 、 N_b 、 N_c 、 N_d 的定义如表 2，例如 N_a 表示在降水检验区内，实况与模拟都出现在某一降水等级内的站点数。

Ts 评分值表示模拟出现在某一降水等级内的准确率。表 3 为 3 例暴雨不同边界层参数化方案对于不同等级降水的评分结果，粗体字表示 7 个边界层参数化方案中的较优者。由表 3 可见，对于暴雨以下量级的降水[0.1, 50)，QNSE 与 MYJ 方案优于其他边界层参数化方案，其中 QNSE 方案又优于 MYJ 方案；对于暴雨量级的降水，QNSE 方案与 MYJ 方案的优势更加明显，其中 QNSE 方案又优于 MYJ 方案。同样对于 2009 年 7 月 23 日与 2011 年 6 月 14 日的大暴雨量级降水，QNSE 方案的评分结果相对是最优的。以上评分结果与对降水的定性分析结果基本一致。

表 2 降水检验分类表

Table 2 The frequency of "yes" and "no" forecasts and occurrences

模拟	实况		
	出现	不出现	总和
出现	N_a	N_b	$N_a + N_b$
不出现	N_c	N_d	$N_c + N_d$
总和	$N_a + N_c$	$N_b + N_d$	$N_a + N_b + N_c + N_d$

表 3 不同边界层参数化方案对于不同等级降水的评分结果

Table 3 Verification results of different precipitation intensities for different PBL schemes

		不同边界层参数化方案的 Ts 评分						
	降水等级	MYJ	QNSE	YSU	ACM2	MYNN2.5	MYNN3	Boulac
2009 年 7 月 24 日个例	[0.1,50)	0.8151	0.8194	0.7596	0.7174	0.7887	0.8007	0.8122
	[50,100)	0.4221	0.4399	0.2721	0.1529	0.4332	0.3559	0.4084
	[100,200)	0.4301	0.4560	0.0710	0.0874	0.3607	0.1098	0.0932
2011 年 6 月 4 日个例	[0.1,50)	0.7329	0.7417	0.6152	0.6062	0.6887	0.6845	0.6854
	[50,100)	0.2170	0.2371	0.0510	0.0576	0.1578	0.1273	0.1122
2011 年 6 月 14 日个例	[0.1,50)	0.6156	0.6292	0.5577	0.5468	0.5946	0.5747	0.5837
	[50,100)	0.2388	0.2527	0.1778	0.2024	0.1973	0.1931	0.2153
	[100,200)	0.3559	0.3965	0.3237	0.3319	0.3080	0.2617	0.3764

注：黑体表示方案中最优者

3.2 基本要素的模拟检验

3.2.1 地面风场与温度的误差检验

为了进一步比较不同边界层参数化方案的差异,定量地验证 QNSE 边界层参数化方案的相对优越性,下面分别给出 3 例暴雨主要降水时段的降水区域内所有站点的地面风场与温度的平均绝对误差。实况风场资料分别是 2009 年 7 月 24 日 03:00~24 日 14:00 的 12 个时次、2011 年 6 月 3 日 21:00~4 日 20:00、2011 年 6 月 14 日 09:00~15 日 08:00 的 24 个时次的地面站资料。表 4 与表 5 分别为不同边界层参数化方案的地表风速与温度的误差检验结果。由表 4 可见,不同边界层参数化方案模拟的风速与实况风速的平均绝对误差不超过 3 m s^{-1} ,其中 2011 年 6 月 4 日与 2011 年 6 月 14 日这两例暴雨的 QNSE 方案模拟的风速与实况风速的平均绝对误差分别为 1.3 m s^{-1} 、 1.5 m s^{-1} ,相对优于其他边界层参数化方案,从三例暴雨的平均值来看, QNSE 相对是最优的。由表 5 可见,不同边界层参数化方案模拟的温度与实况温度的平均误差约在 2°C 左右,其中 2009 年 7 月 23 日过程与 2011 年 6 月 4 日过程的 QNSE 方案模拟的温度相对实测温度的平均绝对误差最小,相对优于其他方案,从三例暴雨的平均值来看, QNSE 相对是最优的。从以上的地面降水、风速和地面温度检验结果来看, QNSE

方案模拟效果最优。这可能与 QNSE 方案考虑了湍流与波的共同作用、气流各向异性、垂直扩散率的衰变等更为细致的物理过程有关。

3.3 边界层结构分析

为了对比不同边界层参数化方案对边界层热量、水汽输送的模拟情况,下面分别选择三例暴雨使用不同边界层参数化方案模拟存在较大差异的强降水区域,并分析所选强降水区附近的位温廓线与水汽混合比廓线(所选垂直廓线区域位置参见图 7)。图 4 给出了 2009 年 7 月 24 日 20:00 时黄山东至附近($29.5^\circ\text{N}\sim 30^\circ\text{N}$, $117^\circ\text{E}\sim 117.5^\circ\text{E}$)强降水区与湖北通山附近($29.6^\circ\text{N}\sim 29.8^\circ\text{N}$, $114.6^\circ\text{E}\sim 114.8^\circ\text{E}$)强降水区的位温(图 4a、4c)和水汽混合比廓线(图 4b、4d)。图中黑色粗线为实况(源于 NCEP 再分析资料)。

由湖北通山附近强降水区的位温廓线(图 4a)可知,位温随高度递增,500 m 以下递增率略大于 500 m 以上递增率, QNSE 方案模拟的位温较好地反映了这一情况。从实况水汽混合比廓线(图 4b)看,水汽混合比随高度递减,500 m 以下递减率略大于 500 m 以上递减率,从地面到 500 m 有稳定边界层存在,500 m 到 800 m 由原来的对流层演化为夜间的夹卷层,800 m 到 1000 m 为对流层, QNSE 方案模拟的水汽混合比廓线反映了高达 500 m 的稳

表 4 不同边界层参数化方案的地表风速的误差检验结果

Table 4 Error test results of surface speed for different planetary boundary layer schemes

	不同边界层参数化方案的地表风速误差						
	MYJ	QNSE	YSU	ACM2	MYNN2.5	MYNN3	Boulac
2009 年 7 月 4 日个例	1.5381	1.3488	2.1735	2.7319	1.6367	1.901	2.1344
2011 年 6 月 4 日个例	1.5871	1.4124	1.8643	1.9183	1.7452	1.7877	1.5052
2011 年 6 月 15 日个例	1.9564	1.8251	1.6924	1.010	1.6984	1.7889	2.015
平均	1.6939	1.5288	1.9101	1.8867	1.6934	1.8259	1.8849

注:黑体表示方案中最优者

表 5 不同边界层参数化方案的近地面温度的误差检验结果

Table 5 Error test results of surface temperature for different planetary boundary layer schemes, the bold one denotes the best of all the PBL parameterizations

	不同边界层参数化方案的近地面温度误差						
	MYJ	QNSE	YSU	ACM2	MYNN2.5	MYNN3	Boulac
2009 年 7 月 24 日个例	1.1693	1.1736	1.5013	1.1603	1.2060	1.1629	1.7113
2011 年 6 月 4 日个例	2.5306	2.5284	3.1394	2.8910	2.6816	2.7739	3.2794
2011 年 6 月 15 日个例	1.7315	1.550	1.8613	2.3452	2.009	2.0213	1.9515
平均	1.8105	1.7507	2.1673	2.1322	1.9655	1.9860	2.3141

注:黑体表示方案中最优者

定边界层, 500 m 到 1000 m 为对流层, 相对接近实况的边界层结构特征。

由东至附近的实况位温廓线(图 4c)可知, 地

面至 500 m 为稳定边界层, 500 m 到 740 m 为夜间残留层, QNSE 方案的位温廓线较好地反映了边界层的这一结构特征, 另外 QNSE 方案模拟的位温递

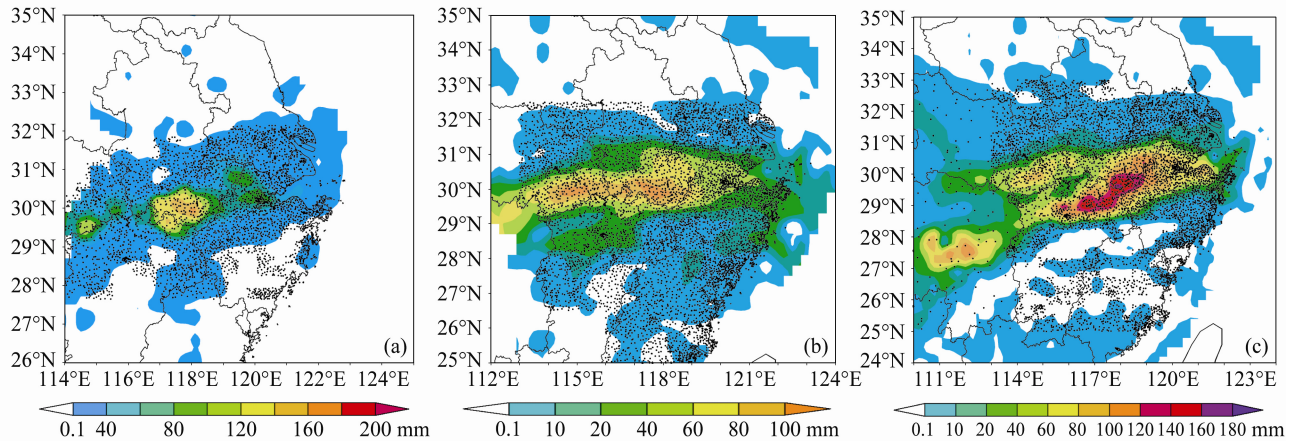


图 3 降水评分的站点分布与 24 小时实况降水: (a) 2009 年 7 月 23 日 20:00~24 日 20:00; (b) 2011 年 6 月 3 日 20:00~4 日 20:00; (c) 2011 年 6 月 14 日 08:00~15 日 08:00。黑点: 站点所在位置

Fig. 3 Locations of observation sites (black dots) for spatial verification: (a) Rainfall from 2000 LST 23 Jul to 2000 LST 24 Jul, 2009; (b) rainfall from 2000 LST 3 Jun to 2000 LST 4 Jun, 2011; (c) rainfall from 0800 LST 14 Jun to 0800 LST 15 Jun, 2011

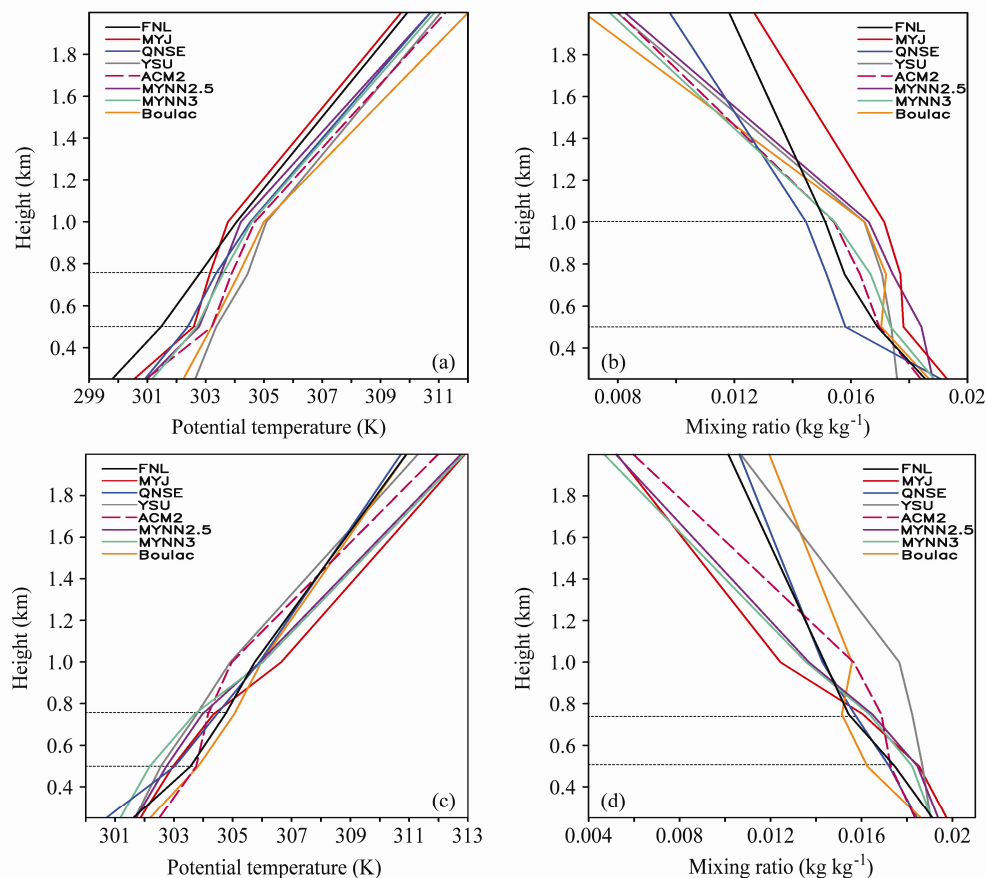


图 4 2009 年 7 月 24 日 20:00 不同边界层参数化方案下的区域平均位温 (a、c) 与水汽混合比 (b、d) 廓线: (a、b) 黄山东至附近; (c、d) 湖北通山附近

Fig. 4 Mean profiles of (a, c) potential temperature and (b, d) water vapor mixing ratio at 2000 LST 24 Jul 2009 simulated with different PBL schemes in the WRF model: (a, b) Dongzhi county of Huangshan city; (c, d) Tongshan city of Hubei Province

增率与实况相对最接近,且 QNSE 方案模拟的位温廓线在 880 m 以上与实况几乎重合。从水汽混合比廓线(图 4d)可见,水汽混合比随高度递减,740 m 以下的递减率小于 740 m 以上的递减率,QNSE 方案的模拟结果较好地反映了水汽混合比的这一变化情况,且递减率与实况相对最接近,相对优于其他边界层参数化方案。

图 5 给出了池州以东的强降水区($29.8^{\circ}\text{N}\sim 30.2^{\circ}\text{N}$, $116.5^{\circ}\text{E}\sim 117.5^{\circ}\text{E}$)与池州以西的强降水区($29.8^{\circ}\text{N}\sim 30.2^{\circ}\text{N}$, $117.5^{\circ}\text{E}\sim 118.5^{\circ}\text{E}$)的位温与水汽混合比廓线。其中黑色线条为实况,源于 NCEP 再分析资料。由池州以西强降水区的位温廓线(图 5a)可知,位温随高度递增,而且 530 m 以下的递增率大于 530 m 以上的递增率,除了 ACM2 边界层参数化以外的各个参数化方案都模拟出了位温随高度的递增情况,但是 QNSE 与 MYJ 方案与实况最为接近。池州以西的强降水区的水汽混合比廓线(图 5b)比较典型,近地层存在厚度高达 530 m 的超绝热层。QNSE 方案较好地模拟了边界层的这一

结构特征,这可能与 QNSE 方案通过尺度消去算法考虑了稳定层结下气流的一些重要特性有关。从图(图 5b)上看,从地面至 530 m 为逆温层,水汽混合比随高度递增,530 m 以上随高度递减,QNSE 方案与 MYJ 方案的模拟结果都较好地反映了这一情况,而且在 530 m 以下,QNSE 方案的递增率几乎与实况相同。由池州以东强降水区的位温廓线(图 5c)可知,7 种不同边界层参数化方案都模拟出了位温随高度递增的实况,但是 QNSE 方案相对其他方案更接近实况。从水汽混合比廓线(图 5d)来看,从 500 m 至 1 km 为水汽混合比随高度变化很小的对流层,QNSE 方案较好地模拟了边界层的这一结构特征。因此,总体而言,QNSE 边界层参数化方案对池州附近强降水区的边界层结构的模拟相对较优。

图 6 给出了 2011 年 6 月 15 日 08:00 时湖北大冶附近($29.7^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $114.5^{\circ}\text{E}\sim 115.5^{\circ}\text{E}$)强降水中心的位温廓线与水汽混合比廓线。其中黑色线条为实况,源于 NCEP 再分析资料。由位温廓线图(图

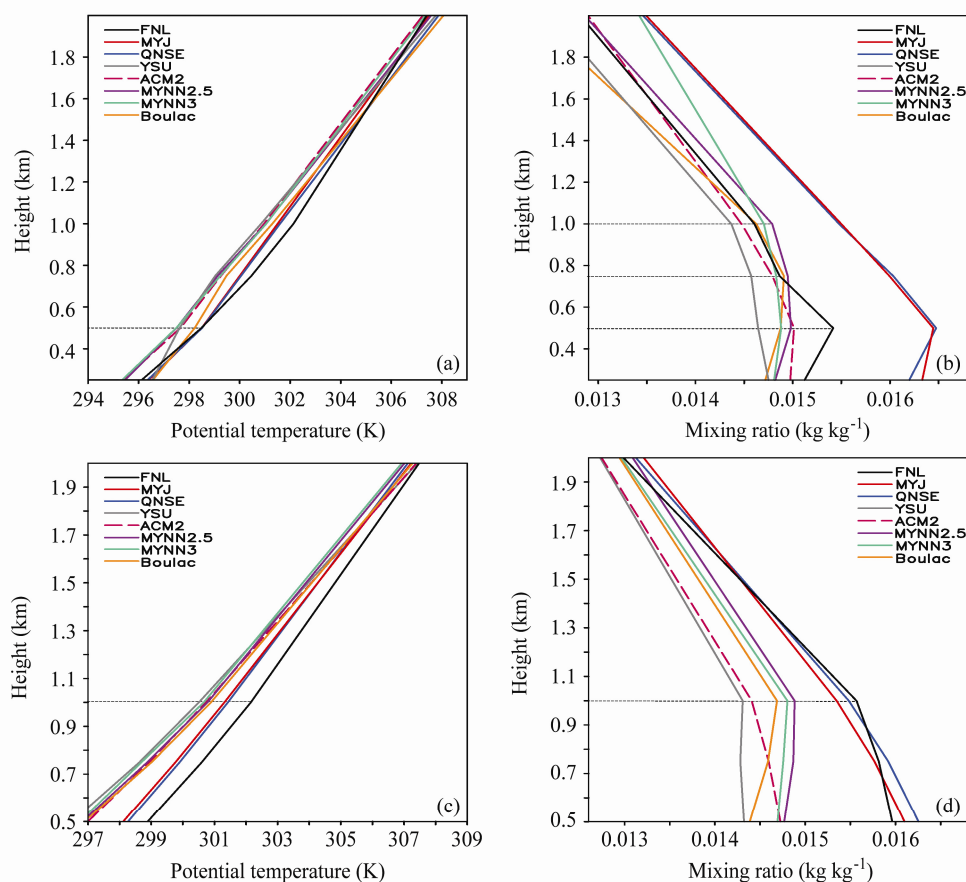


图 5 2011 年 6 月 4 日 20:00 不同边界层参数化方案下的区域平均位温 (a、c) 和水汽混合比 (b、d) 廓线: (a、b) 池州以西; (c、d) 池州以东

Fig. 5 Mean profiles of (a, c) potential temperature and (b, d) water vapor mixing ratio at 2000 LST 4 Jun 2011 simulated with different PBL schemes in the WRF model: (a, b) West of Chizhou city of Anhui Province; (c, d) east of Chizhou city of Anhui Province

6a) 可知, 从地面至 500 m, 位温随高度递增, 之后以相对较大的递增率递增到 760 m, 再以更大的递增率增加到 1000 m, 1000 m 以上递增率减小, QNSE 相对较好地反映了位温随高度的这一递增情况。从水汽混合比廓线图 (图 6b) 上可以清晰地看到边界层的结构特征。从地面至 500 m 是水汽混合比随高度递减的稳定边界层, 且 500 m 至 760 m 为夜间残留层, 760 m 至 1000 m 出现水汽混合比随高度变化很小的对流层, QNSE 方案模拟的水汽混合比廓线与实况比较接近, 较好地反映了边界层的这一结构特征。总体而言, QNSE 方案对湖北大冶附

近强降水区的边界层结构的模拟相对接近实况, 这一结论与对不同边界层参数化降水模拟的分析结果一致 (图略)。

5 结论与讨论

利用 WRF 模式最新版本中的 7 种边界层参数化方案, 逐一试验对长江下游降水的模拟影响, 来比较模式中边界层参数化的效果。通过 2009 年、2011 年的三次典型暴雨过程模拟试验及对降水、基本要素场的统计检验和边界层结构的廓线分析, 得到了以下结论:

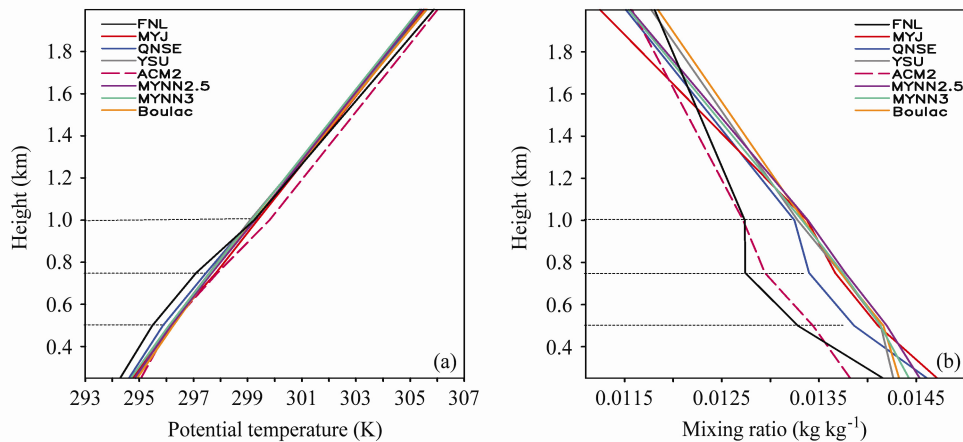


图 6 2011 年 6 月 14 日 08:00 时, 不同边界层参数化方案下的湖北大冶区域平均位温 (a) 和水汽混合比廓线 (b)

Fig. 6 Mean profiles of (a) potential temperature and (b) water vapor mixing ratio over Daye city of Hubei Province at 0800 LST 14 Jun 2011, simulated with different PBL schemes in the WRF model

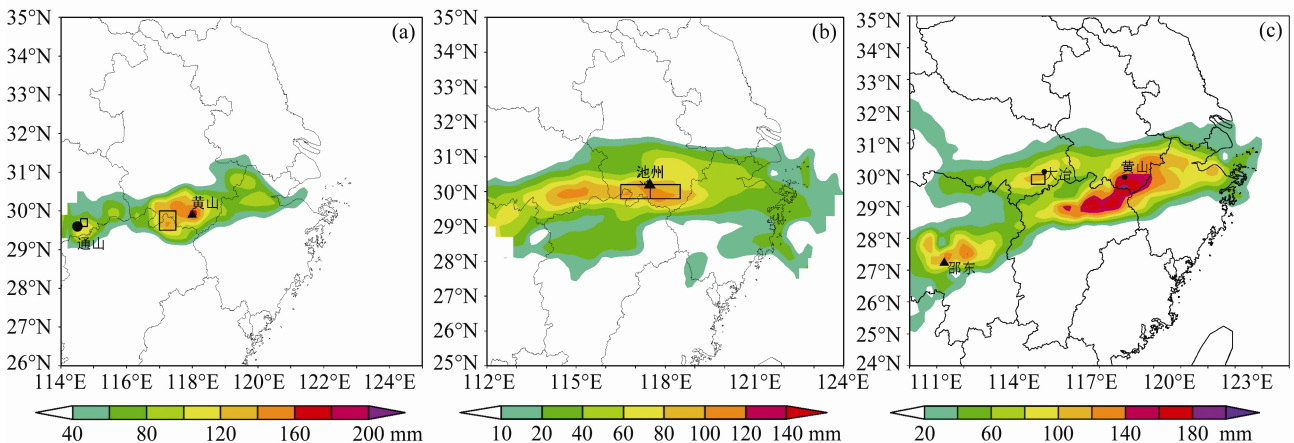


图 7 长江下游三次暴雨过程实况 24 小时累计降水: (a) 2009 年 7 月 23 日 20:00~24 日 20:00, 方框分别表示湖北通山附近 (29.6°N~29.8°N, 114.6°E~114.8°E) 降水区和黄山东至县附近 (29.5°N~30°N, 117°E~117.5°E) 强降水区; (b) 2011 年 6 月 3 日 20:00~4 日 20:00, 方框分别表示池州以西的强降水区 (29.8°N~30.2°N, 117.5°E~118.5°E) 和池州以东的强降水区 (29.8°N~30.2°N, 116.5°E~117.5°E); (c) 2011 年 6 月 14 日 08:00~15 日 08:00, 方框表示湖北大冶附近 (29.7°N~30°N, 114.5°E~115°E) 强降水区

Fig. 7 24-hour accumulated precipitation in three rainstorm cases in the lower reaches of the Yangtze River: (a) Rainfall from 2000 LST 23 Jul to 2000 LST 24 Jul, 2009, rectangles represent rainstorm area of Tongshan city (29.6°N~29.8°N, 114.6°E~114.8°E) and rainstorm area of Huangshan city (29.5°N~30°N, 117°E~117.5°E); (b) rainfall from 2000 LST 3 Jun to 2000 LST 4 Jun, 2011, rectangles represent rainstorm areas west of Chizhou city (29.8°N~30.2°N, 117.5°E~118.5°E) and east of Chizhou city (29.8°N~30.2°N, 116.5°E~117.5°E); (c) rainfall from 0800 LST 14 Jun to 0800 LST 15 Jun, 2011, rectangle represents rainstorm area of Daye city (29.7°N~30°N, 114.5°E~115°E)

(1) 从以上个例的降水试验结果来看, QNSE 方案与 MYJ 方案模拟的 24 h 雨量分布优于其他边界层参数化方案, Ts 评分结果也证实了以上结论, 同时表明 QNSE 方案相对是最优。

(2) 从 Ts 评分、地面全风速的误差检验结果来看, 相对其他边界层参数化方案, QNSE 方案的平均绝对误差偏差是较小的; 由三例暴雨的平均绝对误差的平均结果可以看出, QNSE 方案相对较优。

(3) 从位温与水汽混合比的廓线来看, QNSE 方案较好地模拟了强降水区的边界层结构。在 WRFV3.1.1 中, 采用不同边界层参数化方案对长江下游降水模拟还是有比较明显的差异。总体而言, 湍流动能方案优于一阶闭合方案。此外, 各个湍流动能方案之间也存在明显的差异, 这可能与不同 TKE 方案采用不同闭合技术有关。MYNN2.5 方案与 MYNN3 方案原理上是类似的, 只是所保留的最高阶预报方程不同; MYJ 与 QNSE 方案在不稳定层结下采用相同的原理, 在稳定层结下采用不同的技术, 通过计算各向互异的湍流谱, QNSE 方案得到了稳定层结下各向互异的湍流动量扩散系数与热量扩散系数, 考虑了稳定层结下能量水平输送与垂直输送的差异, 水平气流分量的增加往往以垂直气流分量的减小为代价。同时表明: Richardson 数存在一个范围, 在此范围内, 涡动粘滞系数与扩散系数急剧地递减, 即使 Richardson 数很大, 湍流也并不完全消失。ACM2 方案与 YSU 方案假定存在临界 Richardson 数, 当 Richardson 数大于临界 Richardson 数时, 则认为湍流消失。这可能正是 QNSE 方案表现相对优于其他方案, 尤其优于 YSU 与 ACM2 方案的原因之所在。Boulac 方案是为预报晴空湍流的位置与强度而引进的一种 TKE 方案, 这些方案最明显的一个差异是采用不同原理计算湍流混合长, 这导致边界层的湍流混合强度不同而影响模拟结果。

由于计算条件与观测资料的限制, 我们主要针对长江下游的 3 例暴雨进行模拟试验, 今后随着条件改进, 可以选择更多个例进行模拟对比, 以期取得更有价值的研究结果。

参考文献 (References)

- Berkowicz R. 1984. Spectral methods for atmospheric diffusion modeling [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 30: 201–219.
- Berkowicz R, Prahm L P. 1979. Generalization of K theory for turbulent diffusion. Part 1: Spectral turbulent diffusivity concept [J]. *J. Appl. Meteor.*, 18: 266–272.
- Bougeault P, Lacarrere P. 1989. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117: 1872–1890.
- 陈炯, 王建捷. 2006a. 北京地区夏季边界层结构日变化的高分辨模拟对比 [J]. *应用气象学报*, 17 (4): 406–407. Chen Jiong, Wang Jianjie. 2006a. Diurnal cycles of the boundary layer structure simulated by WRF in Beijing [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 17 (4): 406–407.
- 陈炯, 王建捷. 2006b. 边界层参数化方案对降水预报的影响 [J]. *应用气象学报*, 17 (增刊): 11–17. Chen Jiong, Wang Jianjie. 2006b. Mesoscale precipitation simulation sensitivity to PBL parameterization [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 17 (Suppl.): 11–17.
- Hong S Y, Pan H L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124: 2322–2340.
- 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: 2318–2341.
- 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: 1831–1844.
- Janjić 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.
- Mellor G L, Yamada T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20: 851–875.
- 慕建利. 2009. 陕西关中强暴雨中尺度对流系统研究 [D]. 南京气象学院博士学位论文, 111–116. Mu Jianli. 2009. Study on MCS of the heavy rainfall event in the middle part of Shaanxi [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 111–116.
- Pagowski M. 2008. Nakanishi and Niino improved Mellor-Yamada 1.5 and 2-order closures (2004, 2006) implementation in WRF & 1D WRF PBL model as a tool for development and testing [R]. WRF Users' Workshop, PBL Group Meeting, Boulder, CO, USA.
- Pleim J E. 2006. 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*, 46: 1383–1395.
- Pleim J E, Chang J S. 1992. A non-local closure model for vertical mixing in the convective boundary layer [J]. *Atmos. Environ.*, 26A: 965–981.
- Stull R B. 1991. 边界层气象学导论 [M]. 杨长新译, 赵鸣, 王彦校. 北京: 气象出版社, 1: 2. Stull R B. 1991. An Introduction to Boundary Layer Meteorology (in Chinese) [M]. Yang Changxin Translated, Zhao Ming, Wang Yan Proofread. Beijing: China Meteorological Press, 1: 2.
- Sukoriansky S. 2008. Implementation of Quasi-Normal Scale Elimination model of stably stratified turbulence in WRF [R]. Report on WRF-DTC Visit of Semion Sukoriansky-June.
- Sukoriansky S, Galperin B. 2008. A Quasi-Normal Scale Elimination

- (QNSE) theory of turbulent flows with stable stratification and its application in weather forecast systems [C]// 6th IASME/WEAS International Conference on HEAT TRANSFER THERMAL ENGINEERING and ENVIRONMENT (THE'08). Rhodes, Greece, 376–380.
- 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: 231–257.
- 王寅钧. 2011. 青藏高原东南部 WRF 边界层模拟与观测对比探讨研究 [D]. 南京信息工程大学理学硕士学位论文, 31–32. Wang Yinjun, 2011. Contrast the simulation observation result of WRF model to boundary layer at southeast Tibetan Plateau [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 31–32.
- 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)*, 2010, 29 (6): 1397–1407.
- Wang W, Bruyere C, Duda M, et al. 2010. WRF-ARW V3: User's Guide [R]. Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, 5–40.
- 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: 157–168.
- 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. *Atmospheric Boundary Layer Dynamics (in Chinese)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 20–25.