

# 三种边界层参数化方案的敏感性实验

刘羽<sup>1</sup>, 陈超君<sup>1</sup>

(1. 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉, 430074)

**摘要:** 本文选用 WRF 中尺度模式中的三种边界层方案, 对华中区域的预报效果进行敏感性实验, 结果表明, ACM2 方案和 YSU 方案模拟的气象要素场偏差较小, 且三种方案中 ACM2 方案对降水表现出最好的模拟效果, MYJ 方案效果较差。另外选取两次暴雨个例, 分析模拟结果的差异, 对模拟与实况的气象要素场进行对比, 结果显示 ACM2 方案能够更好的反应大气实际状况, 温湿结构更合理, 整体的模拟效果优于 YSU 方案和 MYJ 方案。

**关键词:** 数值天气预报; 边界层参数化; 降水; 边界层结构

## Sensitive experiments of three planetary boundary layer schemes

LIU Yu<sup>1</sup>, CHEN Chaojun<sup>1</sup>

(1. Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074)

**Abstract:** In the development of modern numerical model, the study of boundary layer plays a key role. In this paper, using three different PBL schemes in Weather Research and Forecast model(WRF), a sensitive experiment for Central China is performed. Results show that ACM2 and YSU schemes give less biases in the simulation of meteorology factors. ACM2 scheme does better on precipitation than YSU scheme, and MYJ scheme does the worst. Two rainstorm cases are selected to analyze and compare meteorological elements between simulation and observation. It is found that ACM2 schemes produces more realistic atmosphere, and more reasonable profiles of water vapour and potential temperature, its overall simulation performance is superior than YSU and MYJ schemes.

**Key words:** numerical weather prediction; boundary layer parameterization; precipitation; PBL struction

### 引言

自数值预报模式诞生以来, 其在科研与业务上的应用越来越广泛, 对数值预报模式的改进研究也一直是气象的前沿课题。为了能够更精确的模拟大气中各种复杂的物理现象, 对数值模式中物理参数化方案的研究始终是一个重要的改进方向, 其中对边界层参数化方案的研究是重要一环, 边界层方案的性能直接影响模式模拟的最终效果。

目前边界层方案可分为两类: 一类是以梯度输送理论为基础理论, 另一类则是以显式预报湍流动能(TKE)为特点。虽然现有的边界层方案基本理论来自上述两种, 但各个方案的实现手段不完全一致, 对边界层内物理过程的细致、复杂程度的描述不同, 关键参数的设定也不尽相同, 因此不同的边界层方案显现出不同的模拟性能。蔡芴宁等<sup>[1]</sup>指出不同边界层方案对垂直速度场、水汽通量散度场、涡度场和风场散度变表现出不同的特征, 因此引入合理的

---

资助项目: 国家自然科学基金(41175016)

第一作者: 刘羽, 男, 1987.02, 主要从事数值预报模式研究。E-mail: njxxgcdxdqkx@163.com

边界层方案对预报效果有显著影响。陆小勇等<sup>[2]</sup>对一次梅雨暴雨过程进行不同边界层模拟,认为虽然现有边界层方案都已考虑了较为全面的物理过程,但越往低层差异越大,对暴雨强度和落区有影响。赵明等<sup>[3]</sup>指出边界层方案通过改善低层大气水热输送及稳定度来改善热、动力过程的模拟,进而影响降水。Hu<sup>[4]</sup>对美国夏季东南部的模拟实验,显示 MYJ 方案的温度与湿度偏差较大,同时垂直扩散公式中的指数取值对 ACM2 方案的效果作用明显。张碧辉等<sup>[5]</sup>对比两种边界层方案对沈阳冬季大气边界层结构的模拟,结果表明 YSU 方案对夹卷层和边界层内混合模拟比 MYJ 方案更强,边界层高度更高。徐慧燕等<sup>[6]</sup>通过对比七种边界层方案,在暴雨两个例试验中认为 QNSE 方案能较好的反映暴雨区边界层结构。

WRF 中尺度数值预报系统 (Weather Research and Forecasting Model) 由美国环境预测中心 (NCEP)、美国国家大气研究中心 (NCAR) 共同开发,优越的性能以及不断的更新发展,使其在气象科研与业务上得到广泛的应用。目前 WRFV3.4.1 版本包含多达 11 种边界层参数化方案。本文以华中区域为研究范围,选取应用最为广泛的三种边界层方案—ACM2 方案、YSU 方案和 MYJ 方案,对该区域的预报效果进行对比分析,考察不同方案对降水、气象要素场的模拟效果。

## 1 方案介绍

YSU 方案属于一阶非局地闭合方案,由 MRF 方案 (Troen<sup>[7]</sup>、Hong<sup>[8]</sup>) 升级而来,考虑大尺度涡旋的作用,引入逆梯度输送来修订通量的计算,在原方案基础上加入夹卷过程的显式处理 (Hong<sup>[9]</sup>),以更精确的描述大气边界层中的物理过程。最新版的 YSU 方案 (Hong<sup>[10]</sup>) 针对夜间稳定边界层做了设置,改进了临界 Richardson 数的取值方法,增加对陆地和海洋下垫面、白天及夜间的区分。

ACM2 方案是一种显式的非局地输送方案,以通量的非局地向上传输和局地向下传输为特点。该方案在 ACM1 方案 (Pleim and Chang<sup>[11]</sup>) 的基础上增加一阶涡旋扩散量 (Pleim<sup>[12,13]</sup>),改进地表附近气象要素的垂直分布。对于稳定和中性边界层,ACM2 方案关闭非局地输送选项,仅使用局地扩散。

MYJ 方案是一种经典的高阶闭合方案,使用 Mellor and Yamada<sup>[14]</sup> 的 1.5 阶湍流闭合方案来表征湍流,通过诊断湍流动能来计算湍流扩散系数 (Janjic<sup>[15,16,17]</sup>),适用于稳定和轻微不稳定的气流。该方案较早提出,但因其概念清晰,满足一定精度要求和节省计算时间等优点而得到广泛应用。

## 2 模式设置

本文中,对 2012 年 5 月 1 日至 7 月 31 日进行为期三个月的模拟实验,每天 08 时 (世界时,下同) 启动,积分 48 小时,共有 92 次模拟数据。使用 0.5°\*0.5°GFS 再分析数据作为初始场,每 6 小时更新边界条件。模拟实验以武汉市 (30.617N, 114.133E) 为中心,采用三重嵌套 (见图 1),格距从外到内分别为 27 km、9 km、3 km,模拟结果的对比分析在第二层区域内进行。除边界层方案分别采用上述的三种外,其他物理过程分别选用:WSM6 微物理方案、RRTM 长波辐射方案、Goddard 短波辐射方案、Noah 陆面过程、KFETA 积云方案。近地层方案的选择取决于边界层方案。当使用 YSU 方案和 ACM2 方案时近地层选用 Monin-Obukhov 方案,当使用 MYJ 方案时,近地层方案则改为 Monin-Obukhov (Janjic) 方案。

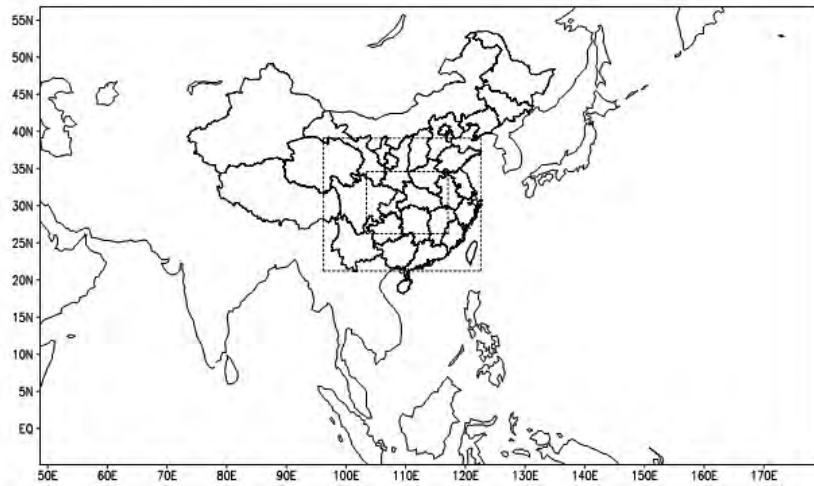


图1 实验区域设置示意图  
FIG.1 Map of model domains

### 3 模拟结果与分析

#### 3.1 批量实验结果分析

图2是2012年5月1日-7月31日累积的观测降水,使用站点数据插值得到。主要的降水区集中在华中地区南部及华南地区,四川东部至南部也存在一个较弱降水区。三种方案模拟的累积降水分为两部分,分别是00-24h累积降水(图3abc)和24-48h累积降水(图3def)。三种方案均较好的反映出三种月累积降水的分布特征,即华中南部及华南地区是降水较多的区域。不足之处在于四川东部的弱降水区表现较差,00-24h降水集中在四川中西部,东部漏报,24-48h降水覆盖了整个四川地区。整体来看,无论是00-24h还是24-48h,三种方案对于累积降水的量级都有高估的现象,其中MYJ方案降水偏差最大,YSU方案其次,ACM2方案最接近实况降水量级。

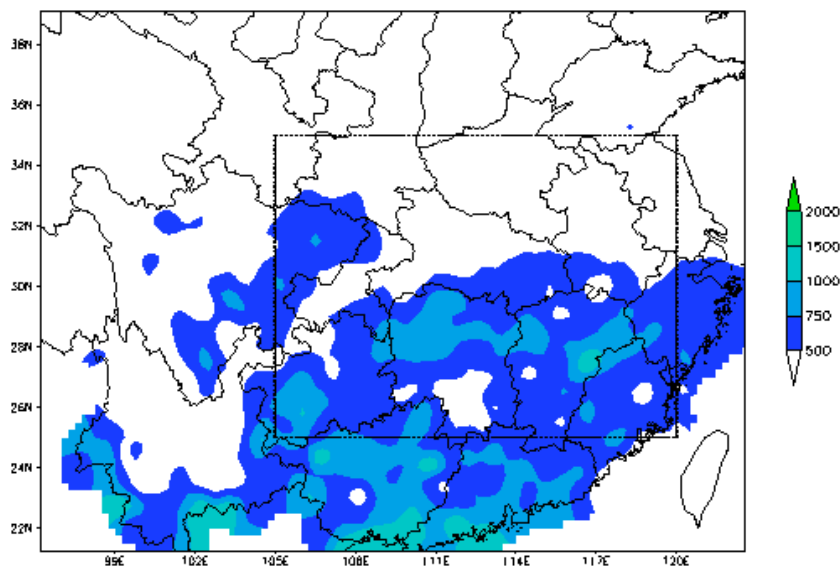


图2 2012年5月1日-7月31日累积观测降水(小区域是评分选用的区域)  
FIG.2 Accumulated observed precipitation during 1 May-31 Jul, 2012 (Small domain is used for score)

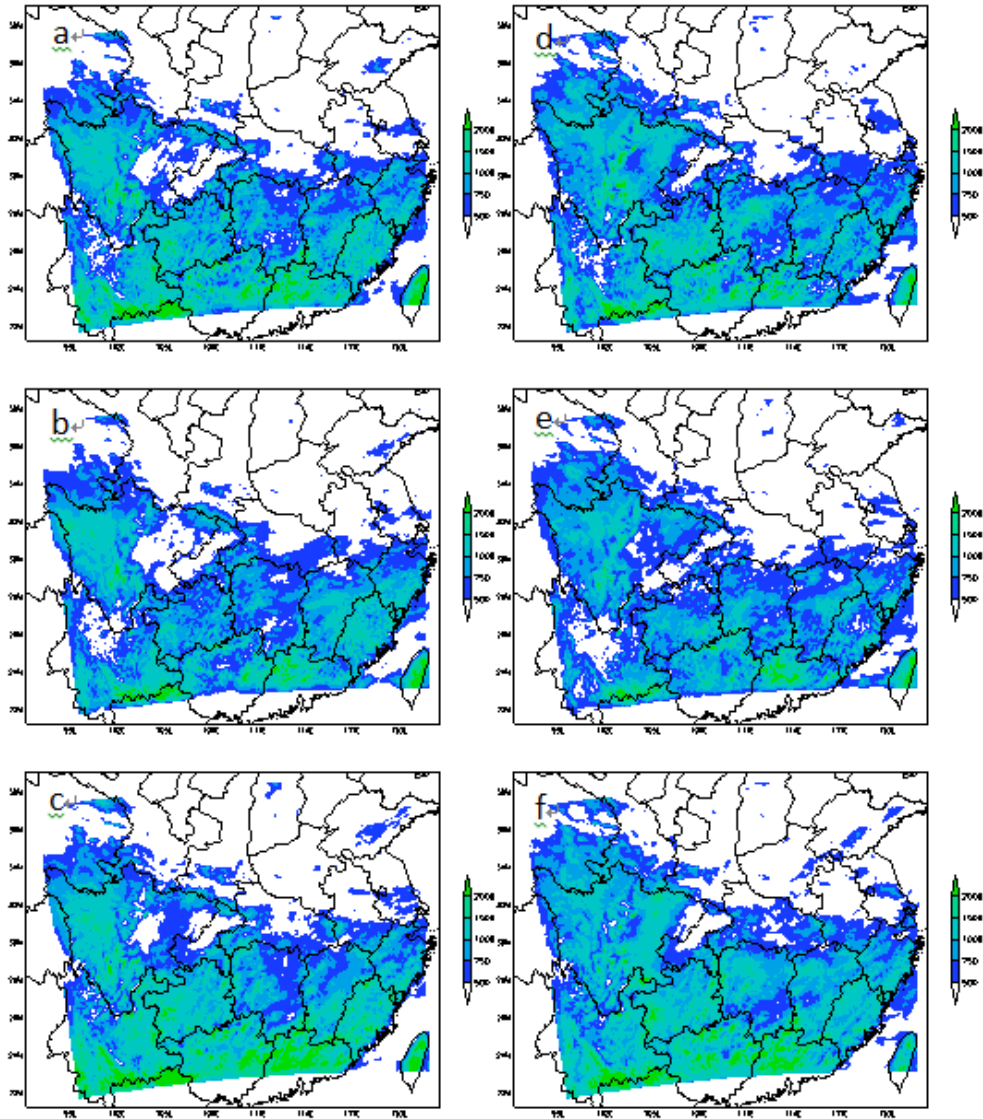


图3 2012年5月1日-7月31日不同边界层方案累积模拟降水  
a. YSU(00-24h); b. ACM2(00-24h); c. MYJ(00-24h);  
d. YSU(24-48h); e. ACM2(24-48h); f. MYJ(24-48h);

FIG.3 Accumulated simulative precipitation with different PBL schemes during 1 May-31 Jul, 2012

为定量分析三种边界层方案模拟效果的差异,对模拟结果进行统计学检验,检验区域为25N-35N, 105E-120E,即图1中黑框标出的小区域。

将降水划分为五个等级进行Ts评分:小雨[0.1,10)、中雨[10,25)、大雨[25,50)、暴雨[50,100)、大暴雨[100,+∞),评分结果依然分00-24h和24-48h两个时段。00-24h降水的Ts评分(表1)显示,对于小雨、中雨、暴雨量级的降水均是ACM2方案最高,MYJ最低。大雨量级ACM2方案不甚理想,YSU方案最优。大暴雨量级ACM2方案则与MYJ方案均较好。对于24-48h降水(表2),中雨、暴雨、大暴雨量级ACM2方案最高,YSU次之,MYJ最低。大雨量级ACM2略低于效果最好的YSU,而对小雨量级的预报ACM2最差,YSU最好。综合来看,YSU方案和ACM2方案体现出更好的预报效果,MYJ方案最差。对于中雨及暴雨以上量级降水,ACM2具有明显优势。

对气象要素场做均方根误差统计（表 3、4）。ACM2 方案在所有时段的 850 hPa 温度和 2 m 温度均有最低误差，这反应 ACM2 方案模拟温度场具有明显优势，且该方案在 00-24 h 预报场的 850 hPa 风场、24-48 h 预报场的 500 hPa 高度和 850 hPa 风场也高于 YSU 方案。可注意到 MYJ 方案的误差明显高于另两种方案，说明该方案对于华中区域气象要素场的把握度较差。

表 1 不同边界层方案对于 00-24h 降水的 Ts 评分

Table.1 TS results of precipitation in 00-24h with different PBL schemes

|      | 小雨          | 中雨           | 大雨           | 暴雨           | 大暴雨          |
|------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| YSU  | 0.603       | 0.353        | <b>0.211</b> | 0.095        | 0.031        |
| ACM2 | <b>0.61</b> | <b>0.358</b> | 0.191        | <b>0.107</b> | <b>0.036</b> |
| MYJ  | 0.59        | 0.329        | 0.201        | 0.092        | 0.036        |

表 2 不同边界层方案对于 24-48h 降水的 Ts 评分

Table.2 TS results of precipitation in 24-48h with different PBL schemes

|      | 小雨           | 中雨           | 大雨           | 暴雨           | 大暴雨          |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| YSU  | <b>0.577</b> | 0.291        | <b>0.162</b> | 0.075        | 0.021        |
| ACM2 | 0.528        | <b>0.296</b> | 0.158        | <b>0.079</b> | <b>0.023</b> |
| MYJ  | 0.564        | 0.278        | 0.158        | 0.066        | 0.018        |

表 3 不同边界层方案对于 00-24h 预报场的均方根误差

Table.3 RMSE results of forecast fields in 00-24h with different PBL schemes

|      | 500hPa 高度   | 850hPa 风场   | 850hPa 温度   | 2m 温度       |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| YSU  | 6.76        | <b>3.58</b> | 1.32        | 2.23        |
| ACM2 | <b>6.46</b> | 3.72        | <b>1.29</b> | <b>2.03</b> |
| MYJ  | 7.15        | 4.08        | 3.13        | 2.16        |

表 4 不同边界层方案对于 24-48h 预报场的均方根误差

Table.4 RMSE results of forecast fields in 24-48h with different PBL schemes

|      | 500hPa 高度   | 850hPa 风场   | 850hPa 温度  | 2m 温度       |
|------|-------------|-------------|------------|-------------|
| YSU  | <b>9.19</b> | <b>4.52</b> | 1.56       | 2.45        |
| ACM2 | 9.24        | 4.59        | <b>1.5</b> | <b>2.23</b> |
| MYJ  | 9.39        | 5.22        | 3.89       | 2.37        |

### 3.2 个例分析

6 月 30 日受西南低涡切变影响，在西南地区东部出现强降水，同时，受 500hPa 高空槽影响，槽前有冷空气推进至华北地区，在淮河流域、副高北部形成一条雨带（图 4a）。为进一步分析 YSU 方案、ACM2 方案和 MYJ 方案模拟效果的不同，下面选择这两次暴雨过程<sup>[18]</sup>，分析暴雨模拟差异的原因，考察强降水区内位温与比湿的垂直廓线，并使用 GFS 资料作为实况资料，与模拟结果的 24-48 h 时段进行对比。下文中两次过程区域平均选取的是图 4a 中方框所选区域。区域 1 对应西南暴雨，范围选择是（104E-109.5E,30N-32N），主要包括了模拟及观测的降水区域。区域 2 对应淮河下游暴雨，范围是（118E-120.5E,33N-34N），主要包括 30 日 18 时至 00 时的降水区域。



模拟结果显示，ACM2 方案（图 4b）对四川盆地东部降水具有最好的模拟效果，YSU 方案（图 4c）和 MYJ 方案（图 4d）降水落区偏西。对于淮河流域的雨带仅有 ACM2 方案有较好体现，另两种方案较差。

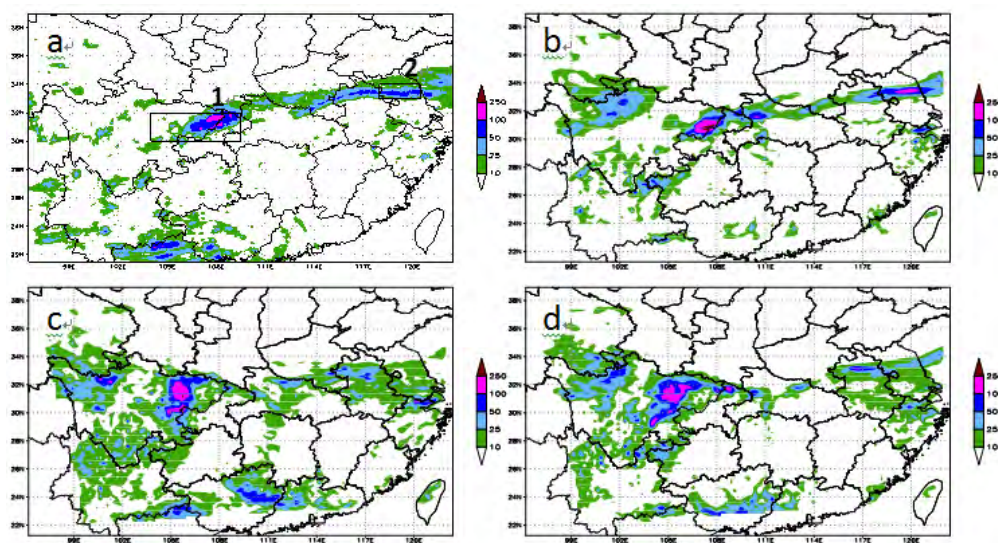


图 4 2012 年 6 月 30 日-7 月 1 日实况降水与模拟降水

a. observed; b.ACM2; c.MYJ; d.YSU

FIG.4 Observed precipitation and simulative precipitation during 30 June-1 July, 2012

### 3. 2. 1 西南暴雨

实况流线图（图 5）能看到 30 日 18 时低涡中心位于（105E，30N），但矢量图（图 6a）中低涡的结构已不明显，低涡正在减弱消失。同时 2012 年 6 号台风登陆减弱，其路径并没有向内陆延伸，而是向西移动。此时台风东北侧的东南风为降水区提供大量水汽，同时已经减弱的低涡东侧出现西南向低空急流，在四川东北部与重庆交界处产生风速辐合，降水开始发展。

三种方案中，ACM2 方案（图 6b）模拟的台风移速偏慢，18 时所在位置比实况略偏东，但也能够反映出台风外围风场为此次降水的水汽供应作用，且低涡中心位置与实况最为接近，强度略强于实况，低涡东北侧存在明显的风速切变，产生降水。MYJ 方案（图 6c）中低涡位置偏北，且模拟的台风也偏北，其中心位置到达广西北部。YSU 方案（图 6d）对于台风位置的模拟与 ACM2 方案接近，水汽输送亦十分明显，但低涡发展强烈且中心偏北。从 500hPa 风场上亦能够看到后两种方案存在明显的气旋式风场（图略）。对比可看出低涡减弱及低涡东侧较强的西南风是降水出现在四川重庆交界的原因。

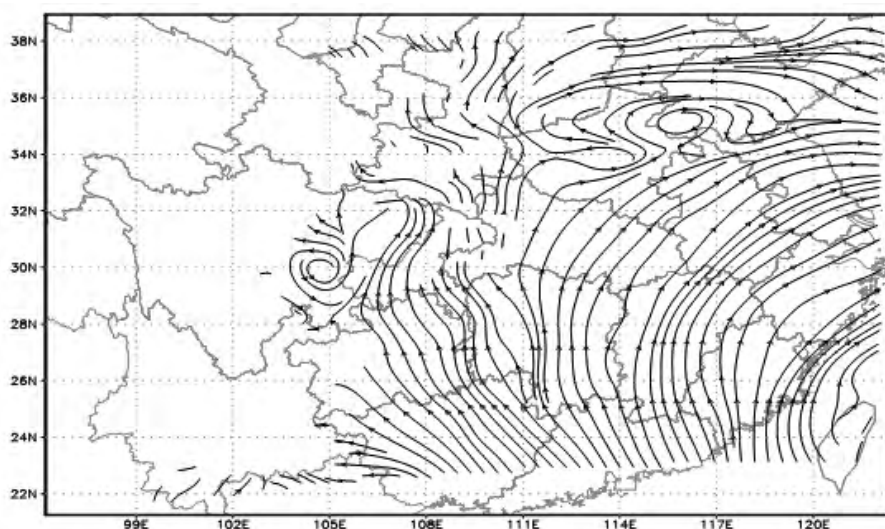


图 5 2012 年 6 月 30 日 18 时 850hPa 实况流线图

FIG.5 850hPa stream line chart at 1800 GMT 30 June, 2012

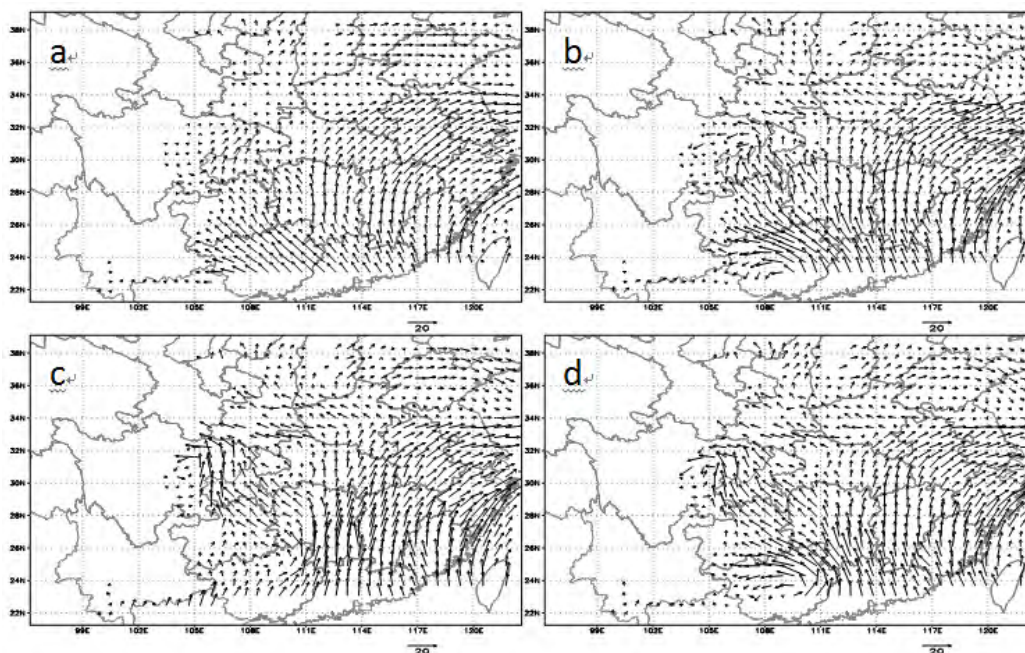


图 6 2012 年 6 月 30 日 18 时 850hPa 实况与模拟的风场图

a. observed; b.ACM2; c.MYJ; d.YSU

FIG.6 850hPa observed wind and simulative wind at 1800 GMT 30 June, 2012

图 7 显示三种方案区域平均温度、水汽与实况差值的时间高度图。ACM2 方案预报的大气低层整体上比实况偏暖（图 7a），且水汽含量偏多（图 7b），低涡强度也略强于实况，东侧强的西南风使得低涡风场结构发生东北-西南向的拉伸，强的风切变使得降水区能够落在此处。MYJ 方案显著湿暖的低层大气（图 7cd）有利于低涡强度的维持，且过于偏北的台风挤压副高，对低涡移动存在一定的影响。YSU 方案除低涡外的风场配置与 ACM2 方案十分接近，但与 ACM2 方案相比，YSU 方案的大气低层也更为湿暖（图 7ef），使得低涡持续发展，东侧不存在西南向低空急流。因此，MYJ 方案和 YSU 方案由于模拟的低涡过强，低层风场配置上与实况偏差较大，使得降水区落在了不同的地方。



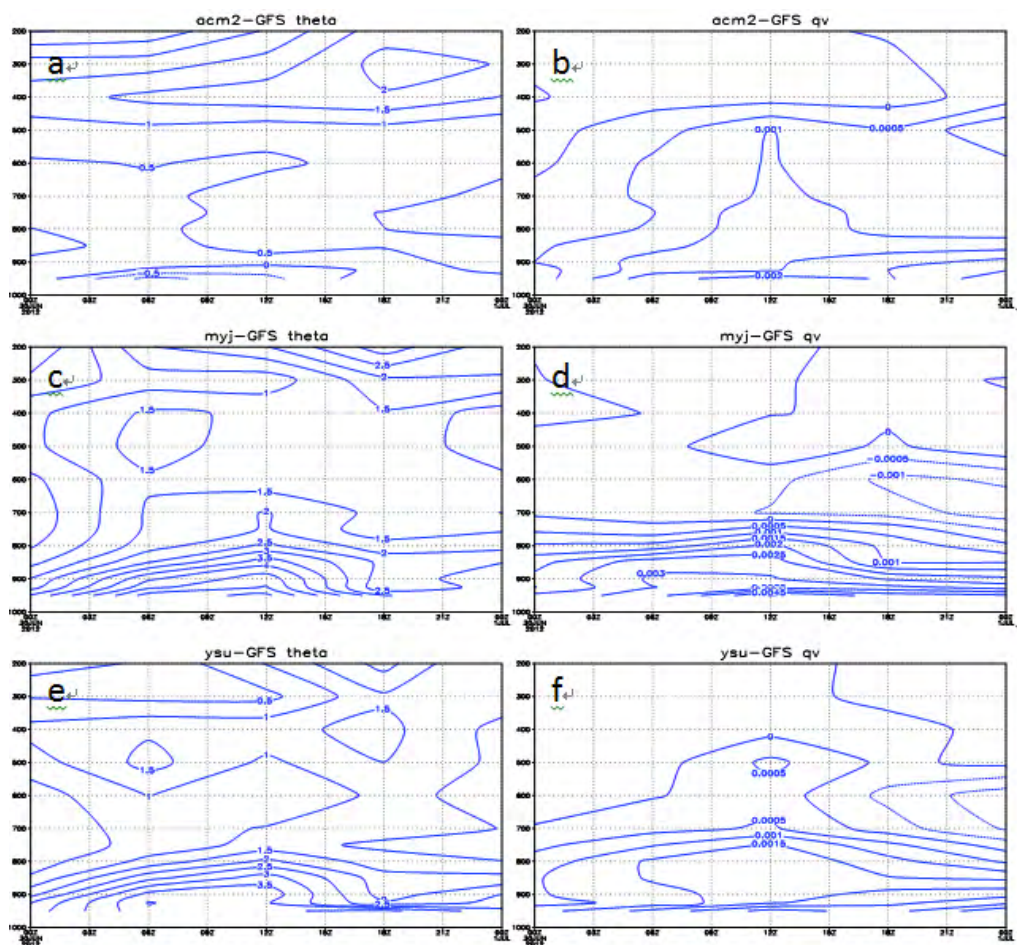


图 7 区域平均模拟与实况差值垂直廓线的时间序列图。左列为位温差值，右列为水汽差值  
a. ACM2-GFS(theta); c. MYJ-GFS(theta); e. YSU-GFS(theta)  
b. ACM2-GFS(qv); d. MYJ-GFS(qv); f. YSU-GFS(qv)

FIG.7 Time series of the vertical profiles of the differences between simulation and observation. Potential temperature is on the left, Specific humidity is on the right

### 3.2.2 淮河下游暴雨

图 8 是淮河下游区域平均的降水时间演变，30 日实测降水分两个阶段，以 18-24 时为主要降水时段，ACM2 方案优势明显，但降水产生时间提前，另两种方案降水则严重偏小。从 850hPa 温度场（图 9）看，对此次冷空气三种方案均有表现。观察 18℃ 等温线可以看出，与实况温度比，模拟的冷空气位置明显偏东，说明模式预报中此次降水的影响系统移动较快，这也是图 8 中 ACM2 方案第二阶段降水产生时间比实况提前 3-4 小时的原因。然而三种方案对温度场的模拟差别不大，降水结果却差异明显。



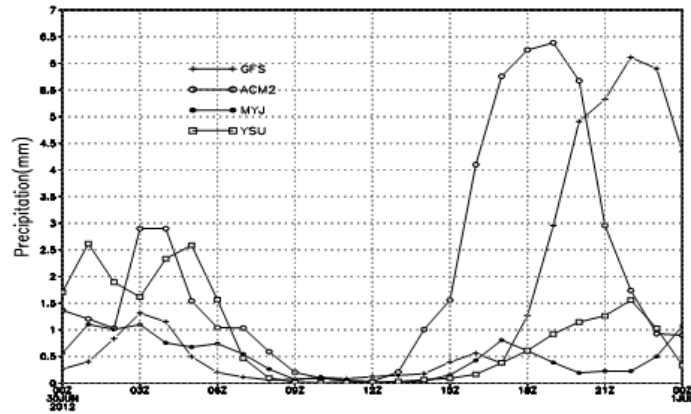


图 8 实况与模拟的逐小时区域平均降水

FIG.8 Time series of domain-averaged precipitation in observation and simulation

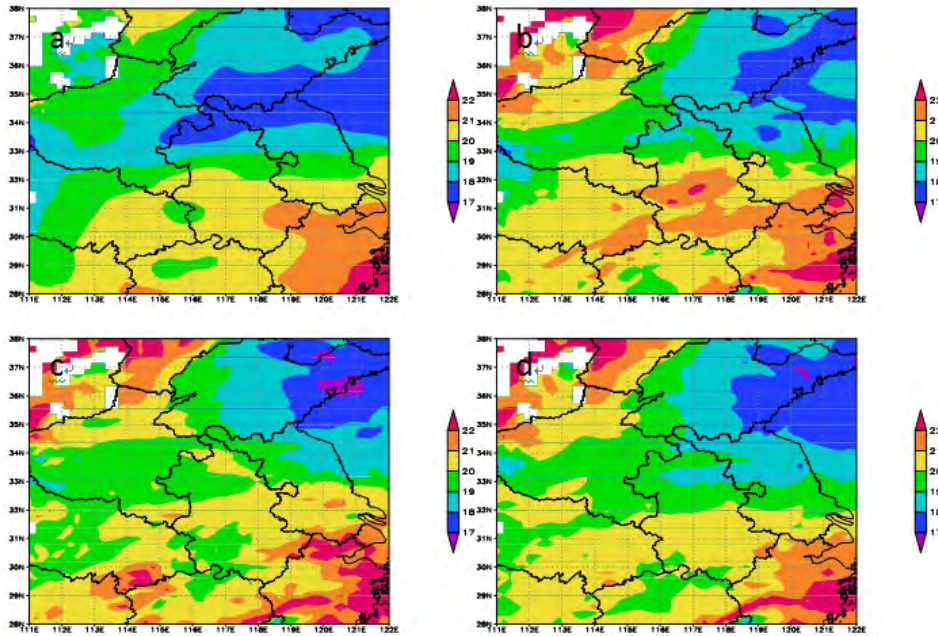


图 9 2012 年 6 月 30 日 18 时 850hPa 实况与模拟温度场

a. observed; b.ACM2; c.MYJ; d.YSU

FIG.6 850hPa observed and simulative temperature at 1800 GMT 30 June, 2012

图 10 是三种方案模拟的不同性质降水的时间序列，可以看出，ACM2 方案与另两种方案的差别在于网格尺度降水。由于模式中网格尺度降水以相对湿度为触发条件，因此下面考察温度和水汽两种气象要素的时空分布。图 11 给出区域平均的三种方案温度水汽垂直剖面图，三种方案在 500hPa 温度均比实况资料偏暖（图 11ace），虽然暖区存在时间略有不同，但整体上大气中层模拟效果较为接近。相比而言，水汽则差别很大（图 11bdf），ACM2 方案在大气中层含有更多的气，MYJ 方案则相对偏少，特别是在 12 时之后的 600hpa 以上高度水汽含量偏小。YSU 方案的水汽时空分布与 MYJ 方案相似，虽在 700hpa 有偏多的水汽，但与 ACM2 方案相比依然偏少。综上所述，ACM2 方案拥有更高的相对湿度，因而更易产生的大量的网格尺度降水。

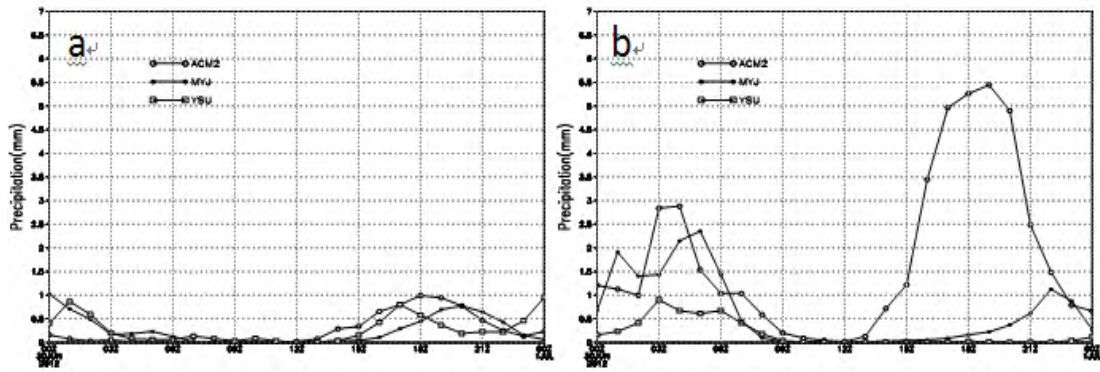


图 10 a. 模拟的逐小时区域平均对流性降水; b. 模拟的逐小时区域平均网格尺度降水  
 FIG.10 a. Time series of domain-averaged cumulus precipitation in observation and simulation;  
 b. Time series of domain-averaged grid scale precipitation in observation and simulation

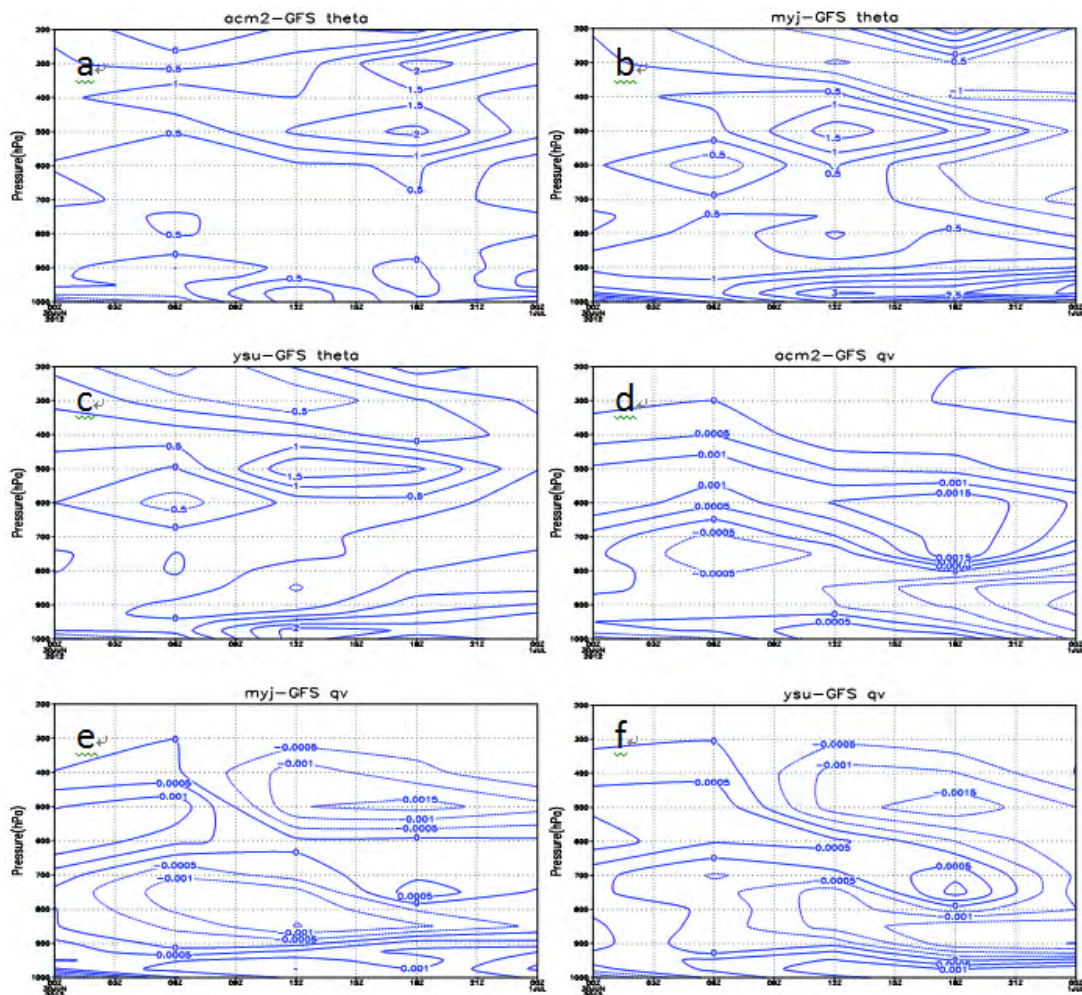


图 11 区域平均模拟与实况差值垂直廓线的时间序列图。左列为位温差值，右列为水汽差值  
 a. ACM2-GFS(theta); c. MYJ-GFS(theta); e. YSU-GFS(theta)  
 b. ACM2-GFS(qv); d. MYJ-GFS(qv); f. YSU-GFS(qv)

FIG.11 Time series of the vertical profiles of the differences between simulation and observation.  
 Potential temperature is on the left, Specific humidity is on the right



可以注意到上述两次暴雨过程中，MYJ 方案总是模拟出最湿最热的大气底层，YSU 方案比 MYJ 方案略好，但与 ACM2 方案相比依然将热量和水汽集中在地表附近。图 12 是两个暴雨过程边界层内做时间-区域平均，更直观的反应出上述不同边界层的性能特点，两个暴雨区边界层低层位温 YSU、MYJ 方案比 ACM2 方案分别高出 4K 和 2K，且水汽也偏高约 1.5g/kg。考虑到 ACM2 方案和 YSU 方案对于边界层高度的计算使用相同的理论，且选用的近地层方案一致，则两者性能的差别可能来自于对湍流输送描述方式的差异。MYJ 方案更暖湿的大气底层，与该方案使用局地扩散理论有关，边界层内较弱的湍流输送使得向上的热量和水汽传输也较弱。

综合以上批量试验统计检验及两个个例对比分析，不同边界层方案模拟出不同的大气状况，对降水产生的位置、时间、降水性质均有显著影响，其中 ACM2 方案是三种方案中最能真实反映大气状况的方案，其显式湍流输送适用于该区域内的天气模拟。

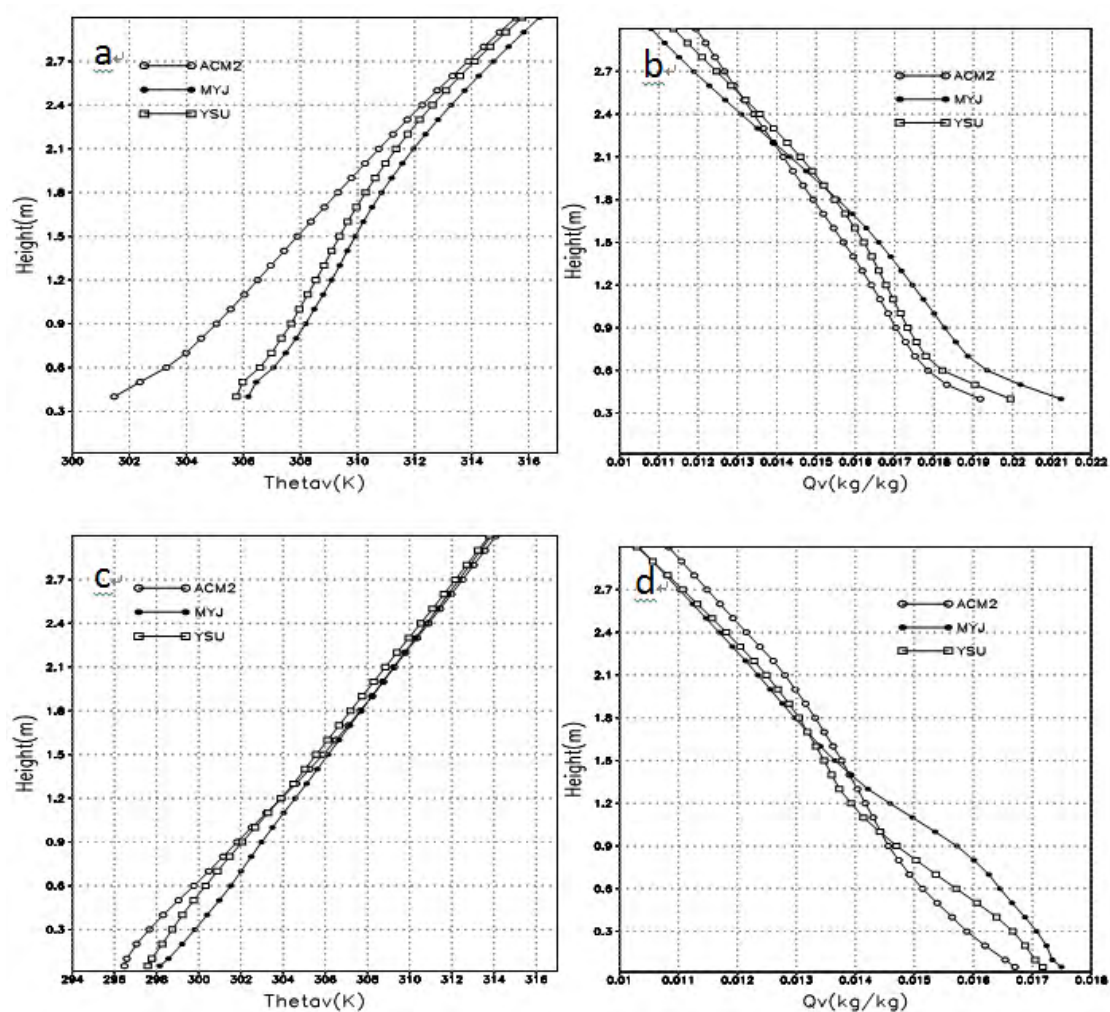


图 12 不同边界层方案的时间-区域平均廓线  
 a. 西南暴雨位温廓线； b. 西南暴雨比湿廓线；  
 c. 淮河暴雨位温廓线； d. 淮河暴雨比湿廓线

FIG.12 Time-Domain-averaged profiles simulated with observation different PBL schemes  
 a. potential temperature in Xinan rainstorm; b. Specific humidity in Xinan rainstorm;  
 c. potential temperature in Huai river rainstorm; d. Specific humidity in Huai river rainstorm

## 4 结论与讨论

边界层参数化方案的性能对数值预报模式的模拟结果具有重要影响。本文通过选用三种不同的边界层方案进行批量敏感性实验,对华中区域的降水和气象要素场进行统计学检验,并选取两次强降水过程,考察不同边界层方案对暴雨区边界层廓线的模拟效果。

1) 批量试验的累积降水显示,三种方案的整体降水落区特征较为一致,但在降水量级存在明显的差别,均模拟出偏多的降水,其中 MYJ 方案模拟严重偏多,特别是在华中区域的南部,ACM2 方案最为接近实测降水。

2) 降水 Ts 评分及形势场的均方根误差,均反映 YSU 和 ACM2 方案在性能上比 MYJ 方案更具优越性,这体现了对于华中这一水汽充沛、地形多样的区域,非局地输送方案优于局地输送方案。

3) 从降水个例来看,ACM2 方案很好的反映了西南低涡的发展,因此模拟降水更接近实况,同时该方案模拟大气合理的温湿结构是淮河流域暴雨模拟成功的关键。两个暴雨个例中,MYJ 方案模拟出更湿更暖的大气底层,YSU 方案稍好,但与 ACM2 方案相比依然更多的将热量水汽集中在边界层低层。总体上 ACM2 方案模拟结果更接近真实大气,MYJ 方案效果最差。

YSU 方案和 ACM2 方案考虑非局地的湍流输送,边界层内混合能力较强,而采用局地输送理论的 MYJ 方案使水汽更多的聚集在边界层底部。由于 YSU 方案和 ACM2 方案使用相同的近地层参数化方案,因此两者性能的差异来自于对湍流输送显式或隐式的描述。此外,MYJ 方案单独使用另一种近地层方案,因此近地层方案的差异也可能导致 MYJ 方案与其他两种方案存在性能上的差别,这需要以后进一步的分析研究。

## 参考文献:

- [1]蔡蓁宁,寿绍文,钟青.边界层参数化方案对暴雨数值模拟的影响[J].南京气象学院学报,2006,29(3):364-370
- [2]陆小勇,沈杭锋,吴静.边界层参数化方案在梅雨暴雨模拟中的应用比较[J].浙江气象,2011,32(4):11-16
- [3]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
- [4] Hu Xiao-Ming, John W. Nielsen-Gammon, Fuqing Zhang. Evaluation of Three Planetary Boundary Layer Schemes in the WRF Model[J]. Appl. Meteor. Climatol. 2010, 49(9): 1831-1844.
- [5]张碧辉,刘树华,Liu He-Ping,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
- [6]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
- [7]Troen I, L Mahrt. A simple model of the atmospheric boundary layer sensitivity to surface evaporation. Boundary layer meteorology, 1986, 37:129-148
- [8]Hong Song-You, Pan Hua-Lu. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. Monthly weather review, 1996, 124:2322-2339
- [9]Hong Song-You, Tae-Young Lee. Physical Parameterization in next-generation NWP models. American Meteorological Society, 2005, 1615-1618
- [10]Hong Song-You, Yign Noh. A new vertical diffusion package with an explicit Treatment of Entrainment Processes. Monthly Weather Review, 2006, 134:2318-2341
- [11] Pleim J E, J S Chang. A non-local closure model for vertical mixing in the convective boundary layer. Atmos Environ, 1992, 26A: 965-981
- [12] Pleim J E. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: Model description and testing. J Appl Meteor Climatol, 2007, 46: 1383-1395
- [13] Pleim J E. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part II: Application and evaluation in a mesoscale meteorological model. J Appl Meteor Climatol, 2007, 46: 1396-1409



- [14] Mellor G L, T Yamada. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev Geophys*, 1982, 20: 851–875
- [15] Janjic Z I. The step-mountain coordinate: Physical package. *Mon Wea Rev*, 1990, 18: 1429–1443.
- [16] Janjic Z I. The step-mountain Eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous layer, and turbulence closure schemes. *Mon Wea Rev*, 1994, 122:927–945.
- [17] Janjic Z I. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model. NOAA/NWS/NCEP Office Note 437, 61 pp.
- [18] 邓雯, 闵爱荣, 廖移山. 2012 年 4—10 月我国主要暴雨天气过程简述[J]. *暴雨灾害*, 2013, 32(1):88-96