

张小培, 银燕. 2013. 复杂地形地区 WRF 模式四种边界层参数化方案的评估[J]. 大气科学学报, 36(1): 68-76.

Zhang Xiao-pei, Yin Yan. 2013. Evaluation of the four PBL schemes in WRF Model over complex topographic areas[J]. Trans Atmos Sci 36(1): 68-76. (in Chinese)

复杂地形地区 WRF 模式四种边界层参数化方案的评估

张小培, 银燕

(南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室 江苏 南京 210044)

摘要: 为更加精确地模拟复杂地形地区大气边界层中气象要素, 将 NASA 发布的 SRTM3(约 90 m 分辨率) 地形高度数据引入中尺度气象模式 WRF(weather research and forecasting) 中, 结合四种边界层参数化方案(YSU、ACM2、MYN 2.5 level TKE(简称 MYN)、Bougeault and Lacarrere TKE(简称 BL)) 及模式自带地形数据 GTOPO30(约 1 km 分辨率), 模拟了 2008 年 4 月 24—25 日安徽黄山及周边地区大气边界层气象要素场变化特征, 并对模式输出的 2 m 气温、2 m 露点温度、10 m 风速、湿度廓线与模拟区域内 19 个气象站及 2 个探空站数据进行比较。结果表明, 无论采用哪种地形数据, 四种边界层参数化方案中, YSU 方案模拟的 2 m 气温误差最小, ACM2 方案模拟的 2 m 露点温度和 10 m 风速误差最小; 采用 SRTM3 数据后, 四种边界层参数化方案模拟的 2 m 气温平均均方根误差(root mean squared error, RMSE) 分别降低了 3.79% (YSU 方案)、2.48% (ACM2 方案)、3.8% (MYN 方案)、0.87% (BL 方案); 对 2 m 露点温度模拟, 除 MYN 方案模拟平均 RMSE 降低了 0.59% 外, 其他三种方案模拟误差分别增加了 1.39% (YSU 方案)、0.49% (BL 方案)、0.89% (ACM2 方案); 而对 10 m 风速的模拟结果, 除 ACM2 方案模拟平均 RMSE 降低了 2.28% 外, 其他三种方案模拟误差分别增加了 0.22% (YSU 方案)、2.32% (MYN 方案)、2.45% (BL 方案); 对 2 个探空站点湿度廓线的模拟显示, 各边界层方案均能模拟出水汽的垂直变化趋势, 但模拟效果总体表现为偏湿, 采用 SRTM3 地形数据之后, ACM2 方案模拟部分时刻的低层水汽廓线有所改善。

关键词: 复杂地形; WRF 模式; SRTM3 数据; GTOPO30 数据; 边界层方案

中图分类号: P435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7097(2013)01-0068-09

Evaluation of the four PBL schemes in WRF Model over complex topographic areas

ZHANG Xiao-pei, YIN Yan

(Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to simulate meteorological parameters more accurately in the Planetary Boundary Layer(PBL) over complex terrain, the SRTM3 data from NASA was used in WRF model. With configuration of four PBL parameterization schemes(YSU scheme, ACM2 scheme, MYN scheme, and BL scheme) and two geographical data(SRTM3, GTOPO30), meteorological parameters in the PBL of the Mt Huang area during 24—25 April 2008 were evaluated. Temperature and dewpoint temperature of 2 m, wind speed of 10 m and water vapor distribution from simulation were contrasted to the observational data from 19 meteorological stations and 2 sounding stations in the Mt Huang area. Results show

收稿日期: 2011-11-28; 改回日期: 2011-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41030962); 江苏省“333 人才工程”项目

作者简介: 张小培(1983—), 男, 湖北随州人, 硕士, 研究方向为大气气溶胶、云降水, zxp03@126.com; 银燕(通信作者), 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为大气气溶胶与云降水相互作用, yinyan@nuist.edu.cn.

that YSU scheme was best for 2 m temperature simulation and ACM2 scheme was best for 2 m dew-point temperature and 10 m wind speed simulation in the four PBL schemes with both geographical data; when SRTM3 data was used in WRF model, the mean RMSE of 2 m temperature simulated by the four PBL schemes were reduced by 3.79% (YSU scheme), 2.48% (ACM2 scheme), 3.8% (MYN scheme) and 0.87% (BL scheme), respectively; for 2 m dewpoint temperature, only the mean RMSE by MYN scheme was reduced by 0.59%, while the mean RMSE of YSU, BL and ACM2 schemes increased by 1.39%, 0.49% and 0.89%, respectively; as to 10 m wind speed, only the mean RMSE by ACM2 scheme was reduced by 2.28%, while the mean RMSE of YSU, MYN, and BL schemes increased by 0.22%, 2.32% and 2.45%, respectively; for the vertical distribution of water vapor from sounding report, all of the four PBL schemes can successfully simulate the vertical distribution tendency of water vapor, but all results turned out to be much moister; by using STRM3 data, the vertical distribution of water vapor simulated by ACM2 scheme was improved on low layer during some periods of time.

Key words: complex terrain; WRF model; SRTM3 data; GTOPO30 data; planetary boundary layer scheme

0 引言

大气边界层的结构及其演变对大气中云—辐射相互作用、污染物传输、垂直混合等一系列物理、化学过程起着重要作用,这些过程直接影响大气中臭氧、细粒子($PM_{2.5}$)的产生、传输和清除,因而在污染物传输扩散规律研究中需要准确描述大气边界层气象要素及其变化特征。在对大气的数值模拟过程中,边界层的处理方法决定了模拟的大气边界层和混合层高度、湍流混合强度和时空演变,以及风场的准确性,而它们又对大气中污染物的产生、空间分布、以及清除过程起着重要作用(Ku et al., 2001),因此在进行气象模拟时必须选择最合适的边界层参数化方案,尤其在复杂地形下(Pérez et al., 2006; Zängl et al., 2008)。

WRF(weather research and forecasting)为新一代高分辨率中尺度模式,可用于天气系统模拟(李嘉鹏等, 2009),也可作为大气传输模式的气象驱动场(Ding et al., 2009)。在 WRF 模式边界层方案评估方面, Gilliam and Pleim(2010)利用 WRF3.0 模式结合不同陆面过程方案,分别选用 ACM2 方案与 YSU 方案对美国 2006 年 1 月和 8 月大气要素进行了模拟,认为 ACM2 方案模拟结果更适合作为大气传输模式的气象驱动场。Hu et al.(2010)等利用 WRF3.0.1 模式研究了 YSU、ACM2 以及 MYJ 三种边界层方案对德克萨斯州休斯顿地区 7—9 月大气边界层的模拟情况,发现 ACM2 和 YSU 方案模拟误差较 MYJ 方案要小,且 MYJ 方案模拟的大气边界层较实况偏冷偏湿,并认为不同方案模拟的误差主要是由各方案对边界层中垂直混合强度及边界层

上部夹卷作用的考虑程度不同引起的。值得注意的是, Gilliam and Pleim(2010)和 Hu et al.(2010)对 WRF 模式中大气边界层方案的研究都是基于不同的近地面层方案和陆面过程方案,因此难以真实反映以上几种大气边界层方案在模拟中作用。

本文研究对象为地形复杂的黄山及周边地区。黄山地处安徽省的南部山区,山势呈东北、西南向,南北长约 40 km,东西宽约 30 km,面积约 1 205 km^2 。由于受大气环流、地理位置和海拔高度共同影响,黄山既有亚热带季风特点,又有山地气候垂直变化特征,具有云雾多、温差大、降水多的气候特点,是观测气溶胶与云相互作用的理想地点(林振毅, 2010; 银燕等, 2010)。由于观测地点高海拔高,地形复杂,所以利用数值模式模拟观测期间边界层气象要素分布及变化时需要选定合适的边界层参数化方案。此外,黄山地区高山峡谷众多,山谷风对大气污染物的传输扩散很重要,而山谷风的模拟需要更精确的地形数据以及高分辨率的水平尺度(Jiménez et al., 2005)。由于 WRF 模式与 MM5 模式一样使用的最高精度地形数据为 USGS(United States Geological Survey)制作的 GTOPO30 数据(约 1 km 精度),因而对于地形分布复杂的小尺度分析略显不足(刘伟等, 2007),因此在 WRF 模式中引入更高精度的地形数据尤为必要。基于以上考虑,本文在引入 NASA 发布的地形数据 SRTM3(约 90 m 精度),并选用之前模拟效果较好的陆面过程方案及近地层方案,对 WRF 模式中四种边界层方案结合两种地形高度资料的模拟效果进行评估,从而寻找黄山数值模拟中地形数据与边界层方案的最佳组合,以便为进一步模拟该地区大气颗粒物的传输与扩散以及局地极端天气等研究奠定基础。

1 地形数据及边界层方案介绍

1.1 两种地形数据在 WRF 中的应用

目前 WRF 模式中最高精度地形数据为 USGS 制作的 30 s 分辨率数据,即 GTOPO30。GTOPO30 基于 8 种数据源,由 USGS 的 EROS 数据中心于 1996 年底制作完成并发布 (<http://edcdaac.usgs.gov/GTOPO30/README.asp>)。GTOPO30 的高程基准面平均海平面,全球覆盖,精度没有统一的标准,它取决于各个局部区域的源数据的精度,一般不高于 ± 30 m。此外,GTOPO30 在海洋上的高程一律取为零值(陈俊勇,2005)。SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量,本研究采用第四版的 SRTM3 地形数据,即 SRTM 90 m 分辨率数字高程原始数据(<http://datamirror.csdb.cn/dem/files/ys.jsp>)。SRTM3 数据精度虽高,但在 WRF 模式中的应用尚不多见,因此有必要检验该数据在模式中的应用效果。

图 1 为黄山地区 GTOPO30 与 SRTM3 数据的 GIS(Geographic Information System) 图像,范围为 (116.8 ~ 118.8°E 29 ~ 30.7°N),可以看出 SRTM3 数据能够更加精细地描述黄山地区的复杂地形。

图 2 为 SRTM3 与 GTOPO30 地形数据引入 WRF 模式后二者的差值,图 2 中显示区域为模拟区域的最内层(第 4 层) 1 km × 1 km 分辨率黄山地区。从图 2 可以看出二者的差值在正负 120 m 之间,且在安徽黄山南部以及江西北部出现规则的矩形差异区。经过其他更多地区(图略)的对比发现,这种矩形差异区是由 GTOPO30 初始地形资料的误差引起

的,且这种矩形差异区分布相当广泛,这与 GTOPO30 是由多种数据源合成得到以及卫星扫描中出现的误差有关系。

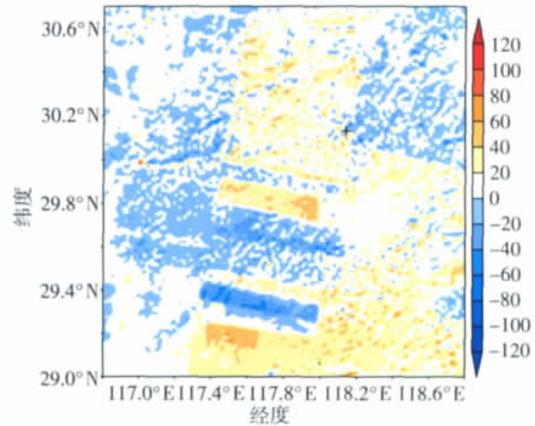


图 2 WRF 模式最内层黄山地区 SRTM3 与 GTOPO30 地形高度差异(单位:m,黑十字线所示为黄山光明顶位置)

Fig. 2 Difference of altitude between SRTM3 data and GTOPO30 data in Mt Huang area in the fourth nest of WRF model(units: m; black cross line represents the location of Guangmingding of the Mt Huang)

1.2 四种边界层方案说明

共选取四种基于边界层方案,分别为 YSU 方案、ACM2 方案、MYN 方案、BL 方案,模式中这四种边界层方案都是基于相同的近地面层方案。

YSU 方案是一种基于 K 扩散模式的一阶非局部闭合方案,详细考虑了夹卷层的作用,并且考虑了湍流扩散方程中的“反向梯度输送项”(Hong et al., 2006),WRF 3.0 模式中,原 YSU 方案中靠近地面

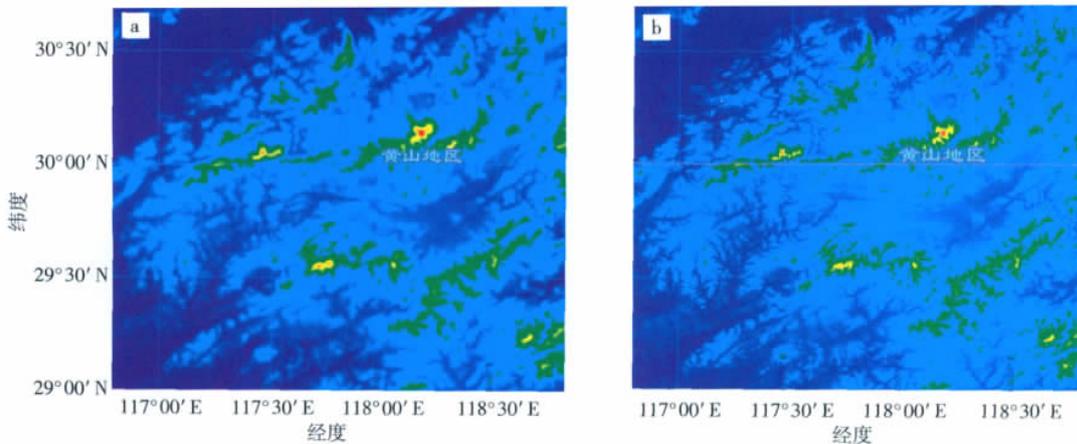


图 1 黄山地区 GTOPO30(a) 与 SRTM3(b) 数据 GIS 图像

Fig. 1 GIS images in Mt Huang area from (a) GTOPO30 data and (b) SRTM3 data

的临界理查森数从 0 改为 0.25,从而使稳定大气层结条件下的混合作用得以加强(Hu et al., 2010)。ACM2 方案最初广泛应用于 MM5 模式中,并用来产生 CMAQ 大气传输模式需要的气象驱动场(Giliam and Pleim, 2010),从 WRF3.0 开始,ACM2 方案开始移植到 WRF 模式中,在稳定或者中性大气层结条件下,ACM2 方案会关闭非局部闭合传输过程并使用局部闭合过程(Pleim, 2007a, 2007b)。

MYN 方案的基本原理是利用 Mellor-Yamada 湍流模式中的预报方程来预测 TKE 和垂直混合,从而用来计算湍流摩擦速度以及垂直扩散(Burchard et al., 1998),MYN 方案于 2009 年引入到 WRF3.1 模式中。BL 方案也是在借鉴 TKE 预测技术基础上产生的,2009 年 BL 方案引入到 WRF 模式中,主要

表 1 模式配置及参数选择

Table 1 Configuration and parameters for each model simulation

	分辨率/km	网格数	陆面过程	近地面层	微物理过程	积云对流	短波辐射	长波辐射
第一层	27	200 × 180	RUC	Monin-Obukhov	Lin	Kain-Fritsch	Dudhia	rrtm
第二层	9	103 × 103	RUC	Monin-Obukhov	Lin	Kain-Fritsch	Dudhia	rrtm
第三层	3	103 × 103	RUC	Monin-Obukhov	Lin	Kain-Fritsch	Dudhia	rrtm
第四层	1	211 × 211	RUC	Monin-Obukhov	Lin	无	Dudhia	rrtm

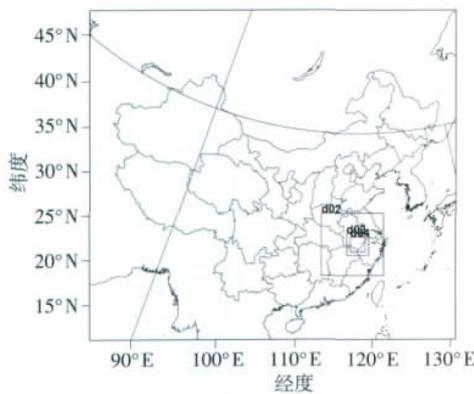


图 3 模式模拟区域

Fig. 3 Spatial configuration of domains used for the numerical simulation

模拟试验共选取四种边界层方案,即 YSU 方案、ACM2 方案、BL 方案、MYN 方案,结合两种地形资料,即 SRTM3 资料、GTOPO30 资料,一共有八种方案组合(表 2)。试验设计的目的主要有两个,一是检验在同一地形资料下,四种边界层方案的模拟效果,二是采用精细地形后,检验四种边界层方案模拟效果的变化情况。

是为 BEP 模式而设计的。

2 试验方案设计

2.1 模拟试验设计

选用模式版本为 WRF3.1.1,模拟采用 $1^\circ \times 1^\circ$ NCEP/NCAR 全球再分析资料,时间步长为 180 s,垂直层次为不等距的 28 层。模式配置及参数选择如表 1 所示。模拟区域如图 3 所示。模式积分初始时刻为 2008 年 4 月 24 日 02 时(北京时间,下同),结束时刻为 4 月 25 日 14 时,模拟结果每小时输出一次,共计 36 h。本文以最内层嵌套区域输出结果进行研究,模式前 12 h 输出结果视为模式调整期数据予以舍弃。

表 2 试验方案设计

Table 2 Test designs

方案名称	地形数据	边界层方案
YSU_G	GTOPO30	YSU
YSU_S	SRTM3	YSU
MYN_G	GTOPO30	MYN
MYN_S	SRTM3	MYN
BL_G	GTOPO30	BL
BL_S	SRTM3	BL
ACM2_G	GTOPO30	ACM2
ACM2_S	SRTM3	ACM2

2.2 实况资料及检验方法

对 WRF 模拟的黄山地区大气边界层内 2 m 气温、2 m 露点温度、10 m 风速及湿度廓线进行了检验,用于检验模拟效果的实况资料为模拟区域内 19 个气象站点的逐小时气象资料以及 2 个探空站点分别在 20 时和 08 时的探空资料。其中 4 月 24 日 15 时气象站点数据缺失,本文对该时刻数据进行了插值补充,19 个气象站点及 2 个探空站点在黄山地区的分布如图 4 所示。

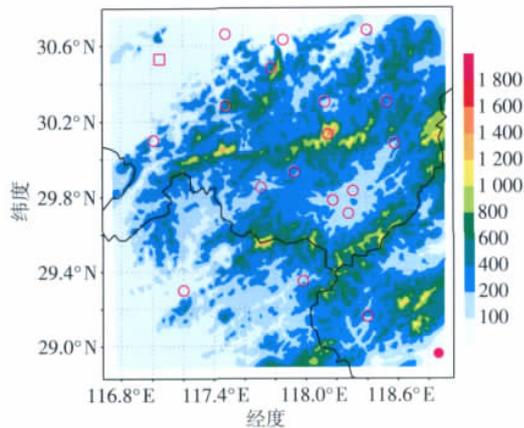


图4 黄山地区地形高度(单位:m)及气象站点分布(空心圆圈表示黄山地区气象站点分布,实心圆圈为探空站点,方框同为气象站点及探空站点)

Fig. 4 Terrain height (units: m) and distribution of meteorological stations in the Mt Huang area (Circles in the picture represent the location of meteorological stations in the Mt Huang area; the dot represents the location of sounding station; squares indicate the meteorological and sounding stations)

在进行模拟效果检验时,本研究采用提取最接近气象站的模式输出格点值与气象站点的观测值进行对比的方法。直接利用最近格点值与观测数据对比的方法虽然有一定的“代表性误差”,但是和利用双线性插值输出模式结果然后再与观测数据对比的方法比较,这两种方法产生的误差不大(Jiménez et al., 2010)。检验方法采用Jiménez et al. (2010)在西班牙山区复杂地形进行风场模拟时采用的均方根误差(root mean square error, RMSE)公式

$$E_{\text{RMS}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [(x_{\text{obs}} - \bar{x}_{\text{obs}})_i - (x_{\text{wrf}} - \bar{x}_{\text{wrf}})_i]^2}}{s_{\text{obs}}} \quad (1)$$

其中: x_{obs} 为气象站点每个时刻气象要素观测值; x_{wrf} 表示每个时刻距该站点最近的模式格点气象要素值; \bar{x}_{obs} 为每个时刻 19 个气象站点气象要素平均值; \bar{x}_{wrf} 为每个时刻 19 个模式格点气象要素平均值; s_{obs} 为每个时刻气象要素观测值标准偏差。

3 模拟结果分析

3.1 试验期间天气形势

在本文的模拟时段内,2008年4月24日20时500 hPa上(图略),中高纬天气形势为两槽一脊型,两槽分别位于俄罗斯西部以及亚洲东部,高压脊位

于贝加尔湖西侧,黄山地区位于东亚大槽后部西北气流之中,24日20时地面图上黄山地区处于冷锋过境后变性的大陆高压控制之中,模拟期间天气晴好,风速小,相对湿度低。

3.2 2 m 气温评估

分析2008年4月24日14时—25日14时2 m气温RMSE(图5)可以发现:4日14—16时,YSU、ACM2两种方案表现较好(图5a、d),而MYN、BL两种方案产生的误差较大(图5b、c);24日17时之后,四种边界层方案模拟的2 m气温RMSE值差别缩小,变化趋势也相似,即都表现误差先增加后减小。通过RMSE平均值可以发现无论WRF模式采取哪种地形资料,四种边界层方案中都是YSU方案模拟的2 m气温RMSE值最小;ACM2方案次之,且与YSU方案模拟效果较接近;再次为BL方案,而MYN方案模拟效果最差。对比GTOPO30地形数据,采用SRTM3数据后,WRF模式中四种边界层方案模拟的2 m气温平均RMSE值都有所降低,分别为3.79%(YSU方案)、2.48%(ACM2方案)、3.8%(MYN方案)、0.87%(BL方案)。

3.3 2 m 露点温度

同一模拟时段内,四种边界层方案结合两种地形高度数据模拟的2 m露点温度变化(图6),可以看出四种边界层方案模拟的2 m露点温度误差值总体变化趋势一致,即在模拟初期误差值比较大,到24日16时后误差均开始减小,24日21时—25日08时之间,各边界层方案模拟误差都比较小,而且维持稳定,随后误差都开始递增,但可以发现模拟的最后一个小时,YSU和ACM2边界层方案模拟的2 m露点温度误差有下降趋势(图6a、d),而MYN和BL方案则没有体现出来(图6b、c)。通过模拟时段内2 m露点温度误差值平均值可以发现,引入精细地形后,四种边界层方案中除MYN方案模拟的2 m露点温度平均RMSE降低了0.59%之外,其他三种方案模拟误差均有所增加,YSU方案增加了1.39%,BL方案增加了0.49%,ACM2方案增加了0.89%,但四种边界层方案中依然是ACM2方案的模拟效果最好,模拟时段内平均RMSE值最低。

3.4 10 m 风速评估

分析同一时段的10 m风速RMSE值发现(图7),四种边界层方案模拟误差在24日14—20时之间、25日05—08时之间差异较大,其他时段差异相对较小,四种边界层方案在25日08时模拟的10 m风速误差最大,其中ACM2方案模拟误差最小

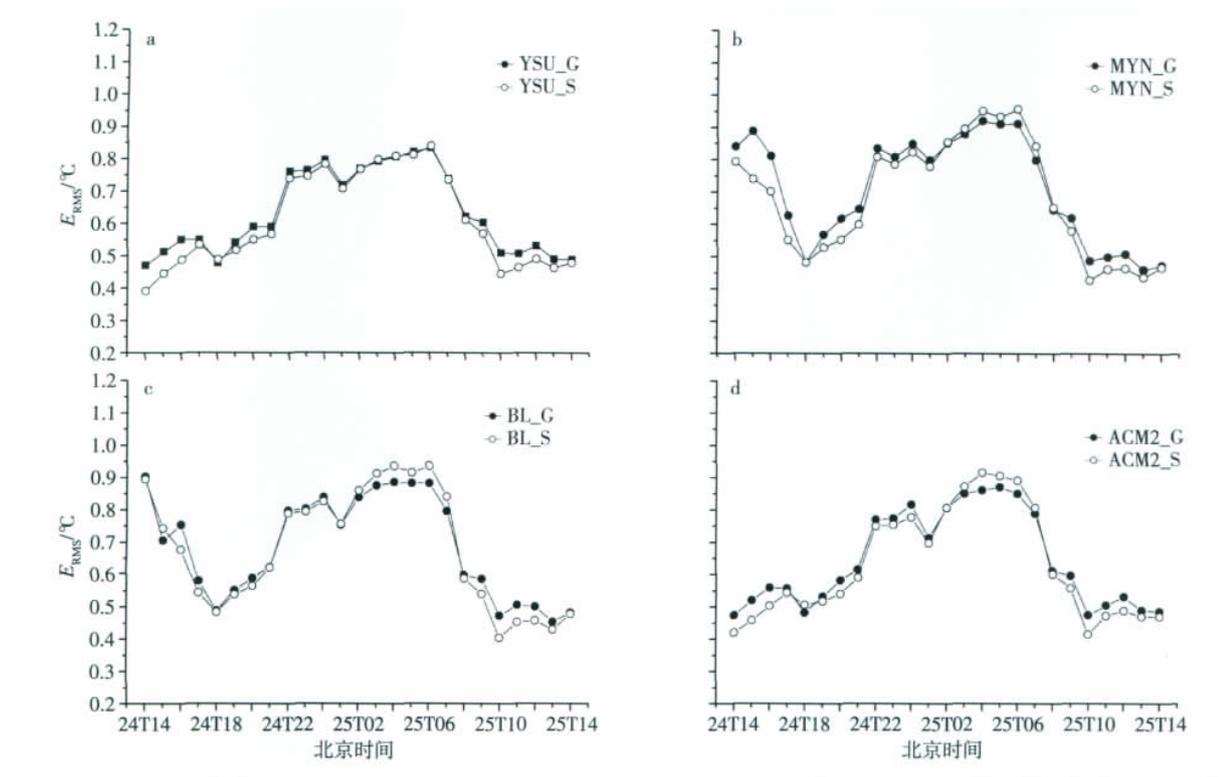


图 5 2 m 气温 RMSE 值(单位: °C)

Fig. 5 RMSE of temperature at 2 m height (units: °C)

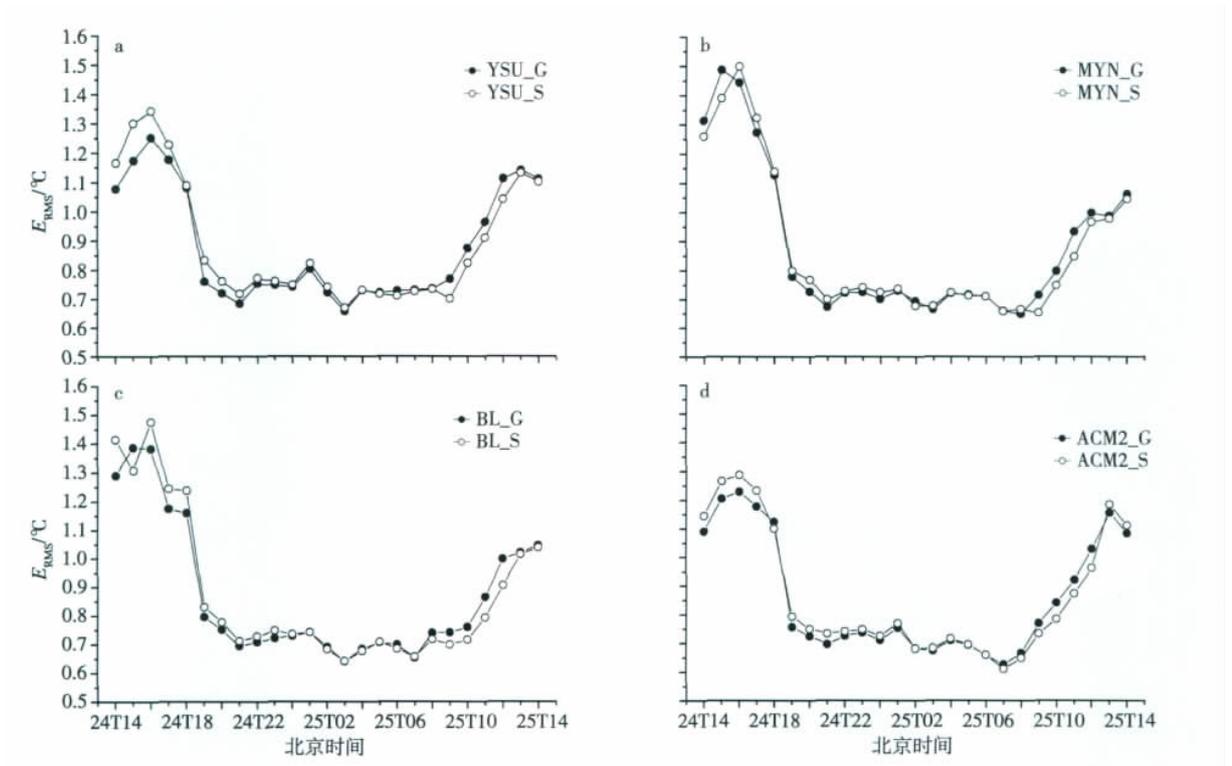


图 6 2 m 露点温度 RMSE 值(单位: °C)

Fig. 6 RMSE of dewpoint temperature at 2 m height (units: °C)

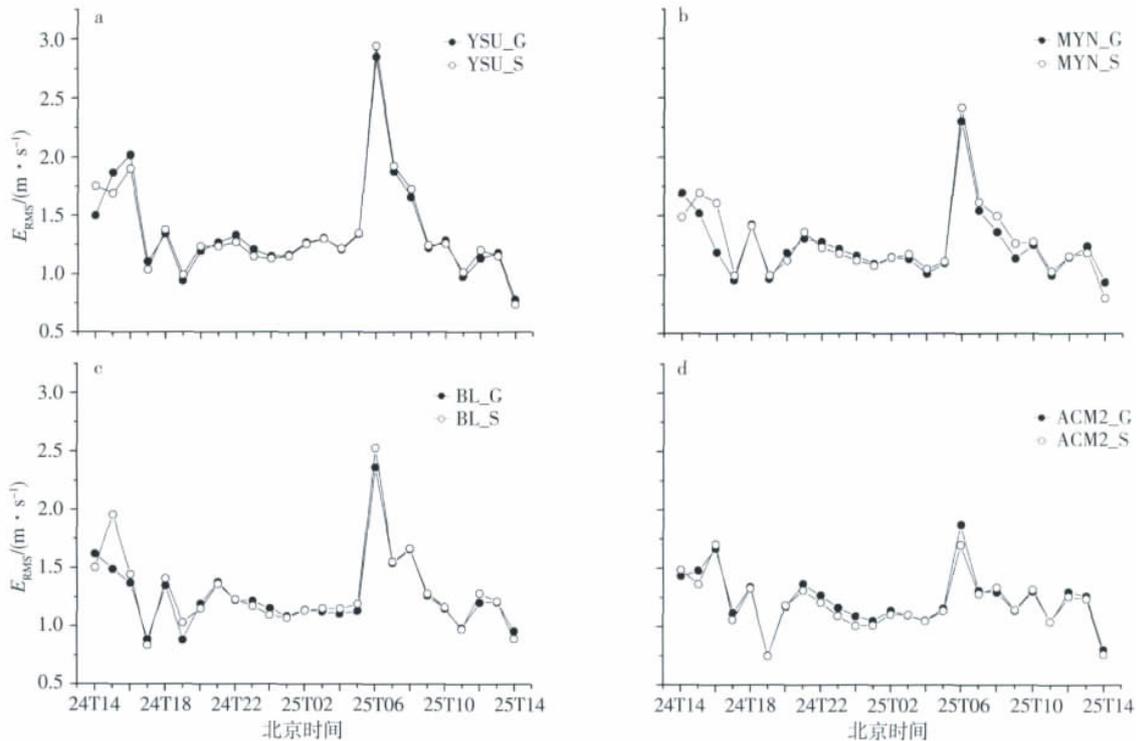


图 7 10 m 风速 RMSE 值(单位: m/s)

Fig. 7 RMSE of wind speed at 10 m height (units: m/s)

(图 7d) 而 YSU 方案模拟的误差最大(图 7a)。由 RMSE 平均值可以发现无论 WRF 模式采取哪种地形资料,四种边界层方案中都是 ACM2 方案模拟的 10 m 风速 RMSE 值最小,MYN 方案次之,再次为 BL 方案,而 YSU 方案模拟效果最差。研究精细地形数据对四种边界层方案模拟 10 m 风速的影响,发现整个模拟时段,四种边界层方案中除 ACM2 方案模拟的 10 m 风速平均 RMSE 降低了 2.28% 之外,其他三种方案模拟误差均有所增加,YSU 方案增加了 0.22%,MYN 方案增加了 2.32%,BL 方案增加了 2.45%。

3.5 水汽廓线模拟

此外,本文还结合模拟区域内两个探空站(安庆、衢县)4月24日20时、4月25日08时实测探空资料,对比了四种边界层方案结合两种地形数据对这两个探空站点水汽廓线的模拟(图8)。24日20时安庆站模拟结果(图8a)显示,四种边界层方案都模拟出水汽廓线的垂直变化特征,但都表现为偏湿,尤其在850 hPa 高度以下,四种边界层方案模拟的湿度偏差为 1.5~2 g/kg,其中 BL 方案模拟偏差最小,而 ACM2 方案模拟偏差最大。24日20时衢县站模拟结果显示(图8b),四种边界层方案模拟基本

模拟出湿度廓线的变化特征,且各方案模拟效果差异没有安庆站表现的差异大,800~1000 hPa 之间依然表现为偏湿,但在 500 hPa 和 1000 hPa 高度却表现为偏干。25日08时安庆站(图8c)显示,四种边界层方案的模拟效果差别不大,在 700~950 hPa 依然表现出偏湿,范围为 0.5~3 g/kg。500~700 hPa 高度 YSU 方案模拟的湿度偏差最大,而 MYN 和 BL 方案模拟效果相当。25日08时衢县站模拟结果(图8d)显示,四种边界层方案模拟的水汽廓线误差主要出现在 350~850 hPa 高度,其中在 350~450 hPa 高度表现为模拟值偏干 0.2~0.7 g/kg,而在 450~850 hPa 总体表现为偏湿 0.25~1.2 g/kg,四种边界层方案中 MYN 方案模拟效果最好,而 YSU 方案模拟效果最差。研究两种精度地形资料对四种边界层方案模拟水汽廓线影响发现,引入 SRTM3 地形数据后,对 4 中边界层方案模拟的水汽廓线主要影响表现在低层,尤其是 850 hPa 以下,如 ACM2_S 方案模拟的 850 hPa 以下水汽廓线有所改善(图8a),但地形数据的改变对其他三种边界层方案模拟效果影响不大。

4 结论

本文在引入精细地形数据 SRTM3 的基础上,

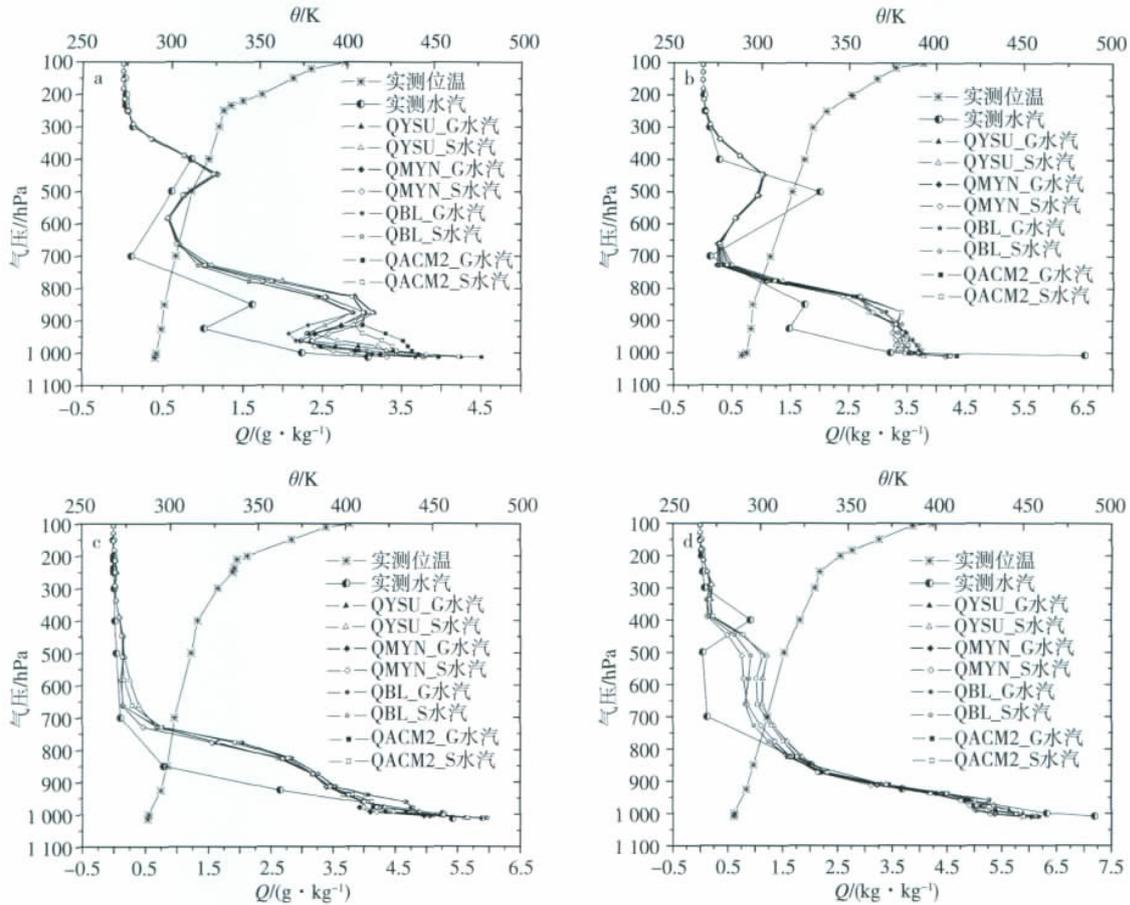


图 8 不同方案对模拟区域内安庆 (a c)、黟县 (b d) 探空站点水汽廓线模拟 a、b. 4 月 24 日 20 时; c、d. 4 月 25 日 08 时

Fig. 8 Vertical distribution of water vapor from different schemes for the two sounding sites in the Mt Huang area a、b. 20:00 BST 24 April; c、d. 08:00 BST 25 April

对比 WRF 模式常用地形数据 GTOPO30 结合 WRF 模式中四种边界层参数化方案 (YSU、ACM2、MYN、BL) 模拟了黄山地区复杂地形下 24 h 边界层气象特征,并结合边界层内 2 m 气温、2 m 露点温度、10 m 风速以及水汽廓线评估了两种地形、四种边界层方案在黄山地区的模拟情况。结果表明:

1) SRTM3 地形数据较 GTOPO30 数据能更精确描述黄山复杂地形。四种边界层方案中,YSU 方案在模拟 2 m 气温方面表现最好,ACM2 方案与 YSU 方案模拟效果接近,而 MYN、BL 方案在模拟初期效果较差;在模拟 2 m 露点温度及 10 m 风速方面,ACM2 方案模拟效果最好。

2) 研究精细地形数据对四种边界层方案模拟效果影响发现,使用 SRTM3 数据后,四种边界层方案模拟的 2 m 气温平均 RMSE 值分别降低了 3.79% (YSU 方案)、2.48% (ACM2 方案)、3.8%

(MYN 方案)、0.87% (BL 方案);除 ACM2 方案模拟的 10 m 风速误差有所降低外,其他三种方案模拟的 10 m 风速误差值均有所增加,但 ACM2 方案模拟的 2 m 露点温度误差有微弱增加。

3) 四种边界层方案均能模拟出水汽的垂直分布变化趋势,但模拟结果均偏湿,引入高精度地形数据之后,24 日 20 时安庆站,ACM2 方案模拟的水汽廓线在低层有所改善。

总体而言,在引入 SRTM3 地形数据的基础上结合 ACM2 边界层方案能够更好的模拟黄山地区边界层内底部气温、风场变化特征,但对水汽廓线的模拟并不是最好,因此在复杂地形地区运用 WRF 模式结果作为粒子传输模式的气象输入场时 (Fast and Easter, 2006; Ding et al., 2009; Foy et al., 2011),如果模式不考虑湿沉降,ACM2 方案结合 SRTM3 地形数据可作为最佳选择。

致谢: 本文 SRTM3 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://datamirror.csdb.cn>); GTOPO30 数据来自美国地质勘探局(USGS) (http://eros.usgs.gov/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30_info)。谨致谢忱!

参考文献:

- 陈俊勇. 2005. 对 SRTM3 和 GTOPO30 地形数据质量的评估[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 30(11): 941-944.
- 李嘉鹏, 银燕, 金莲姬, 等. 2009. WRF 模式对澳洲一次深对流系统的模拟研究[J]. 热带气象学报, 25(3): 287-294.
- 林振毅. 2010. 黄山顶大气气溶胶及云雾微观特性观测分析[D]. 南京: 南京信息工程大学大气物理学院.
- 刘伟, 高艳红, 冉有华, 等. 2007. 不同分辨率地形数据对黑河流域模拟结果的对比分析[J]. 高原气象, 26(3): 525-531.
- 银燕, 陈晨, 陈魁, 等. 2010. 黄山大气气溶胶微观特性的观测研究[J]. 大气科学学报, 33(2): 129-136.
- Burchard H, Petersen O, Rippeth T P. 1998. Comparing the performance of the Mellor-Yamada and the κ - ϵ : Two-equation turbulence models[J]. J Geophys Res, 103(C5): 10543-10554.
- Ding A, Wang T, Xue L, et al. 2009. Transport of North China air pollution by midlatitude cyclones: Case study of aircraft measurements in summer 2007 [J]. J Geophys Res, 114, D08304. doi: 10.1029/2008JD011023.
- Fast J, Easter R. 2006. A lagrangian particle dispersion model compatible with WRF [C]//7th Annual WRF User's Workshop. Boulder.
- Foy B, Burton S P, Ferrare R A, et al. 2011. Aerosol plume transport and transformation in high spectral resolution lidar measurements and WRF-FLEXPART simulations during the MILAGRO field campaign[J]. Atmos Chem Phys, 11(7): 3543-3563.
- Gilliam R C, Pleim J E. 2010. Performance assessment of new land surface and planetary boundary layer physics in the WRF-ARW[J]. J Appl Meteor Climatol, 49(4): 760-774.
- 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(9): 2318-2341.
- Hu X M, Nielsen-Gammon J W, Zhang F. 2010. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model[J]. J Appl Meteor Climatol, 49(9): 1831-1844.
- Jiménez P, Jorba O, Parra R. 2005. Influence of high-model grid resolution on photochemical modelling in very complex terrains[J]. International Journal of Environment and Pollution, 24(1): 180-200.
- Jiménez P A, Gonzalez-Rouco J F, Garcia-Bustamante E. 2010. Surface wind regionalization over complex terrain: Evaluation and analysis of a high resolution WRF simulation[J]. J Appl Meteor Climatol, 2010, 49(2): 268-287.
- Ku J Y, Mao H, Zhang K. 2001. Numerical investigation of the effects of boundary layer evolution on the predictions of ozone and the efficacy of emission control options in the northeastern United States [J]. Environ Fluid Mech, 1(2): 209-233.
- Pérez C, Jiménez P, Jorba O. 2006. Influence of the PBL scheme on high-resolution photochemical simulations in an urban coastal area over the Western Mediterranean [J]. Atmos Environ, 40(27): 5274-5297.
- Pleim J E. 2007a. A Combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: Model description and testing [J]. J Appl Meteor Climatol, 46(9): 1383-1395.
- Pleim J E. 2007b. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part II: Application and evaluation in a mesoscale meteorological model [J]. J Appl Meteor Climatol, 46(9): 1396-1409.
- Zängl G, Gohm A, Obleitner F. 2008. The impact of the PBL scheme and the vertical distribution of model layers on simulations of Alpine foehn [J]. Meteor Atmos Phys, 99(1): 105-128.

(责任编辑: 张福颖)