



论文

MM5 和 WRF 对北京地区低层大气局地环流模拟能力的对比研究

刘振鑫^{①②}, 刘树华^{①②③*}, 胡非^③, 李炬^②, 马雁军^④, 刘和平^⑤

① 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871;

② 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089;

③ 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029;

④ 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016;

⑤ Department of Physics, Atmospheric Sciences & General Science, Jackson State University, P O Box 17660, Jackson, MS, USA

* 联系人, E-mail: lshuhua@pku.edu.cn

收稿日期: 2010-07-19; 接受日期: 2011-05-02

国家自然科学基金(批准号: 40875004)、中国气象局北京城市气象研究所城市气象科学研究基金(编号: UMR200702)、科学技术部公益性行业专项(气象)科研专项基金(编号: GYHY200806020)、国家科技支撑计划项目(编号: 2008BAC37B00)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金(编号: IUMKY200701)资助

摘要 为了检验中尺度模式 MM5 和 WRF 在大气边界层局地环流研究中的适用性, 本文应用 MM5V3.7 和 WRFV2.2 对北京地区低层大气中温度场和风场等边界层特征量进行了若干个例模拟, 将模拟结果与该区域 19 个自动气象站的观测资料进行相关性检验和误差分析, 比较两个中尺度模式对该地区大气边界层中存在的中尺度局地耦合环流结构的模拟能力. 结果表明 WRF 与 MM5 对该地区由海陆风环流、山谷风环流和城市热岛环流共同作用形成的大气边界层局地耦合环流的位置、范围、结构特征和日变化特征的模拟均与实测结果较为吻合; WRF 和 MM5 对近地面温度场的模拟精度均明显高于对近地面风场的模拟精度. MM5 比 WRF 对于地表热力过程的描述更加细致精确, 因而对该地区近地面温度场的模拟精度比 WRF 略高. WRF 对近地面风场, 尤其是对阵风背景下的近地面风场结构有比 MM5 更好的模拟能力. 另外, 模拟结果以及其统计分析均表明: WRF 与 MM5 对近地面风场的模拟精确度均由城郊到市区逐渐降低, 反映了两种模式对城市复杂下垫面精细结构条件下的陆面过程的描述均有待进一步改进.

关键词

WRF 和 MM5
北京地区
局地大气环流
模拟精度
比较研究

京津冀地区低层局地大气环流结构及其变化是京津冀地区气候和环境问题研究中的重要课题. 该地区低层大气环流与当地海陆地形分布、地表覆盖状况、人为热源, 以及大尺度天气系统等多种因素(见图 1)有关, 变化复杂. 受渤海海陆风环流、燕山太行山

地形山谷风环流, 以及京津冀城市群热岛环流三者的共同作用, 京津冀地区低层大气受三种局地低层环流的耦合环流的影响显著^[1], 在无天气系统影响的情况下, 该地区大气边界层风温场呈现出一些明显的结构特性以及日变化和季节变化规律^[2-6]. 这样独

英文引用格式: Liu Z X, Liu S H, Hu F, et al. A comparison study of the simulation accuracy between WRF and MM5 in simulating local atmospheric circulations over Greater Beijing. Sci China Earth Sci, 2011, doi: 10.1007/s11430-011-4310-2

特的热力动力分布和大气边界层特性的存在,对该地区的局地天气过程,气候以及大气环境产生了重要影响.这些影响直接关系到环渤海经济圈的可持续发展和京津城市群的宜居性.因此,随着计算机性能的提高,以及各种尺度的大气模式的不断完善,有必要对该地区的大气边界层局地环流特征进行更为精细的数值模拟研究.

城市复杂下垫面上的大气边界层局地环流特征的精细化数值模拟研究是中尺度数值模式的重要组成部分,对于城市中小尺度天气系统的数值模拟以及灾害性天气短时预报预警具有重要意义.最近 30 年来,中尺度数值模式得到了迅速发展,此类模式以 MM5(the Fifth-Generation Pennsylvania State University-National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model)和 WRF (Weather Research and Forecast)等的应用最为广泛.

MM5 是由 20 世纪 70 年代美国宾西法尼亚州立大学(PSU)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合研制的一个适合于有限区域的中尺度模式.在最新发布的 Ver3.7 版本^[7]中,模式具有强大的单向或双向多重网格嵌套能力;对较小的模拟尺度增加了非静力框架;对有关水汽相变、积云对流、大气长波短波辐射、行星边界层和陆面物理过程等的考虑,采用了较真实的地形和下垫面分类和多种参数化方案.这些特点使得 MM5 不仅被应用于暴雨、台风^[8-10]等短期天气预报,同时也成为空气质量研究^[11-16]以及大气边界层数值模拟的有力工具.

近年来,一些学者^[17-25]分别应用 MM5 中不同的参数化方法对不同城市复杂下垫面上的大气边界层等进行数值模拟,结果表明,MM5 具备对大气边界层结构和近地面风温场的模拟能力.在大气边界层模拟中,PBL 和 LSM 参数化方案的选择至关重要^[26].近地面风温场的模拟精度会直接影响大气污染物的扩散和输运路径的模拟精度.但 MM5 不能反映降水造成土壤湿度变化和植被覆盖动态作用对地面通量的影响^[27].

WRF 于 2000 年 10 月首次发布.它针对 MM5 中尺度模式中存在的缺陷进行了一些的改进.WRF 完全建立在非静力的框架下,对中尺度对流系统的模拟更为准确可靠^[28,29].另外,WRF 可移植性强,易于维护和扩充,并且加入了多种物理参数化方案可供用户选择,这使得 WRF 模式系统能够比较准确地再

现中尺度过程中大气环流形势的演变,因此,WRF 也逐渐被广泛地运用于大气边界层以及城市复杂下垫面陆面过程的数值模拟研究当中^[30-34].

Grell 等^[30],陈炯等^[31]和缪国军等^[32]使用 WRF 模式,分别选用不同的边界层参数化方案和陆面参数化方案,对 Jacksonville,北京和兰州等多个地区的不同季节的大气边界层结构进行高分辨率模拟,并分析了相关地区近地面层风场、温度场以及边界层变化特征,结果发现,WRF 模式基本能够模拟出了大气边界层的日变化和季节变化特征;在该版本的 WRF 所包括的边界层方案中,MYJ 方案对城市边界层结构的描述较 YSU 方案更合理;Noah 陆面模式能较好地反映了城市的热岛效应;无降水时,风速及边界层高度对于陆面过程不敏感,而降水发生后,陆面过程对于边界层结构的影响增大;各方案模拟的城区风速明显偏大,这是因为没有充分考虑城市建筑物的阻力作用.

目前,越来越多的大气边界层研究者逐渐由 MM5 转向 WRF 进行中尺度大气边界层结构的数值模拟工作.由于这两种相似功能的模式系统的动力框架和参数化过程处理方案有很多不同之处,因此非常有必要对二者的模拟能力进行比较,进而方能在不同时空尺度和研究目标的数值模拟工作中对两种模式做出合理的选择.当前已经有学者对 MM5 和 WRF 在中尺度天气系统模拟中的精度进行了对比研究^[35-37],结果表明,WRF 对于强对流天气系统精细结构的模拟能力高于 MM5.本文则使用 MM5V3.7 和 WRFV2.2 对京津冀地区大气边界层内的各气象变量的区域场和时间序列进行若干个例的数值模拟实验,再对相关变量统计结果进行分析,并与该区域 19 个自动气象站(见表 1 和图 1 中的站点示意图)的观测资料作对比,进而比较两种中尺度模式在复杂地理地形和城市区域大气边界层局地环流特征的模拟能力.

1 相关参数的设定

本文中分别用 MM5(Version3.7)和 WRF (Version2.2)设定相同的模拟区域.在模拟区域中均采用 3 层网格双向嵌套,模拟区域的分布以及相互的嵌套关系见图 2. MM5 最内层(domain 3)格距 3 km,格点数 97×97; WRF 最内层(domain 3)格距 3 km,格

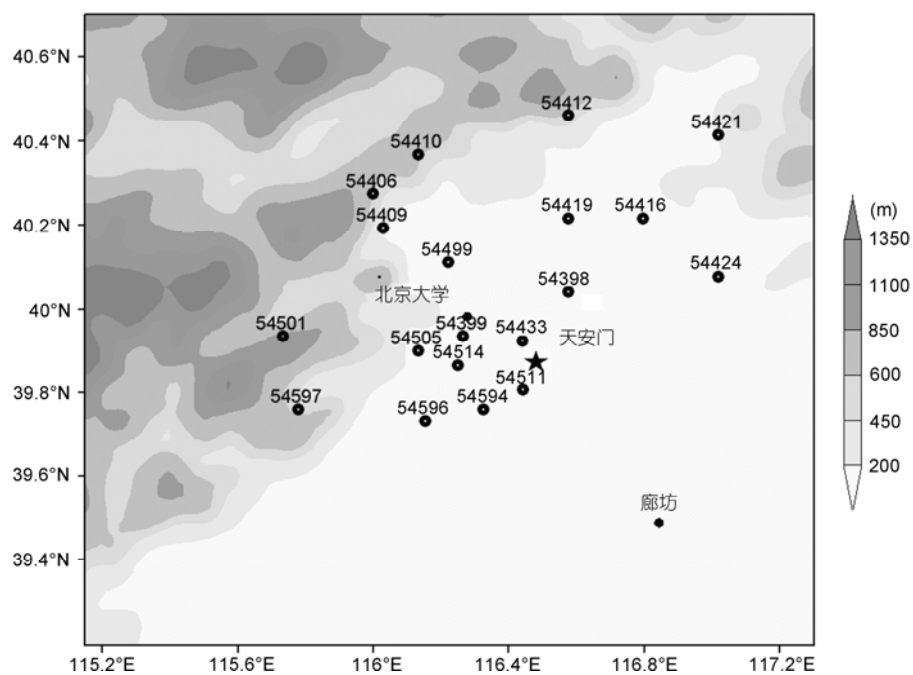


图 1 北京区域地形图以及文中所选自动气象站位置示意图

表 1 文中选用的北京地区 19 个自动气象站基本情况一览表

站号	站名	经度(E)	纬度(N)	海拔高度(m)
54398	顺义	116°37'00"	40°07'00"	29.6
54399	海淀	116°16'00"	39°58'00"	46.9
54406	延庆	115°58'00"	40°27'00"	489.4
54409	八达岭	116°00'00"	40°20'00"	633.2
54410	佛爷顶	116°07'00"	40°35'00"	1216.9
54412	汤河口	116°37'00"	40°43'00"	333.7
54416	密云	116°52'00"	40°22'00"	73.4
54419	怀柔	116°37'00"	40°22'00"	75.6
54421	上甸子	117°07'00"	40°39'00"	286.5
54424	平谷	117°07'00"	40°10'00"	32.1
54433	朝阳	116°28'00"	39°57'00"	36.5
54499	昌平	116°13'00"	40°13'00"	74.1
54501	斋堂	115°40'00"	39°58'00"	441.1
54505	门头沟	116°07'00"	39°55'00"	92.9
54511	观象台	116°28'00"	39°47'00"	32.5
54514	丰台	116°15'00"	39°52'00"	57
54594	大兴	116°20'00"	39°43'00"	38.8
54596	房山	116°08'24"	39°40'38"	39.2
54597	霞云岭	115°43'00"	39°43'00"	409.4

点数 121×121. 二者的范围均覆盖京津冀地区的所有城市群, 大部分山地平原结合地带和渤海部分地区. 模拟区域的中心位置为 39°54'27"N, 116°23'17"E, 大致与天安门重合. 地形资料采用了美国 USGS 资料, 分辨率为 30 s. 该资料中的 LANDUSE(土地利用)一

项, 共有 24 种土地利用分类, 这种高分辨下垫面信息的使用为精细数值模拟提供了必要的基础. 模式在垂直方向采用 sigma 坐标, 按照上疏下密的原则划分为: sigma=1.00, 0.9975, 0.995, 0.925, 0.99, 0.9875, 0.985, 0.9825, 0.98, 0.975, 0.97, 0.965, 0.96,

表 2 在 MM5 和 WRF 数值实验中所采用的物理过程参数化方案

	MM5(ver. 3.7)	WRF(ver. 2.2)
微物理过程	Schultz	Schultz
积云方案	KF2(domain 3 除外)	KF2(domain 3 除外)
边界层方案	YSU	MYJ
辐射方案	RRTM(长波) Dudhia(短波)	GFDL(长波) Dudhia(短波)
陆面过程方案	Pleim-Xiu	Noah

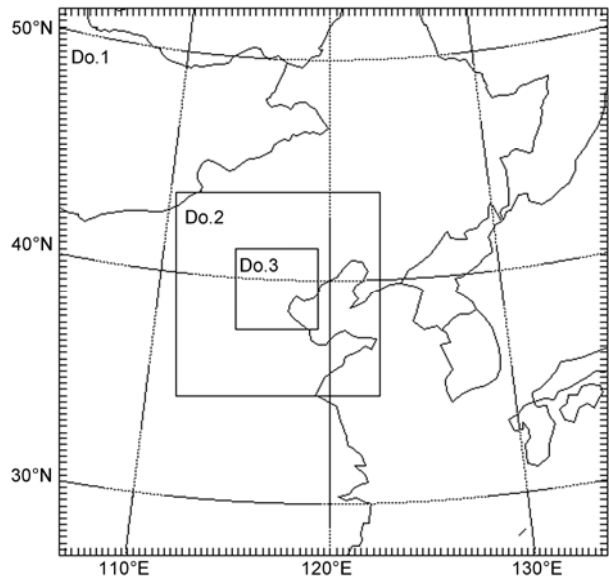


图 2 WRF 和 MM5 中模拟区域的分布以及相互嵌套位置关系

Do.1, Do.2 和 Do.3 分别表示 domain 1, domain 2 和 domain 3

0.95, 0.90, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65, 0.60, 0.50, 0.40, 0.30, 0.20, 0.10, 0.00 等 27 层. ($\sigma = (P - P_{\text{top}}) / (P_{\text{bottom}} - P_{\text{top}})$), 其中 P_{bottom} 为模式地面气压, P_{top} 为模式顶气压, 在本文中 $P_{\text{top}}=100 \text{ hPa}$ 本研究一开始先用两个模式分别对该模拟实例进行了参数化方案的敏感性数值实验, 进而分别选择对该实例模拟结果精度最高的参数化方案的组合(见表 2)来进行对比实验.

初始场选用 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 分析资料, 每 6 h 更新一次侧边界. 模式积分步长 5 s, 数据输出间隔设定为 1 h. 我们选定北京时间 2007-04-01 8:00 至 2007-04-06 8:00; 2007-08-14 8:00 至 2007-08-19 8:00; 2007-10-12 8:00 至 2007-10-16 8:00; 2008-08-14 8:00 至 2008-08-20 8:00 这几个时段进行模拟, 每个时段的前 12 h 作为模拟的平衡时间. 这几个时间段北京地区

天空晴朗, 风速较小, 有利于研究山谷风环流、城市热岛环流和海陆风环流及其相互作用下的局地环流特征. 文中重点以 2007 年 8 月为例分析比较 WRFV2.2 和 MM5V3.7 对该地区局地环流的模拟能力.

2 MM5V3.7 和 WRFV2.2 模拟与观测结果分析

2.1 近地面风场模拟与观测结果对比分析

图 3 给出了 2007 年 8 月 15 日当地时间 18:00, 北京区域近地面风场的水平分布. 图 3(a), (b) 中的浅色箭头分别是 MM5V3.7 和 WRFV2.2 的模拟结果, 深色圆点和箭头分别表示自动气象站(AWS)的位置和相应的实测结果. 图中的灰度色阶表示地形高度, 箭头的长度和方向表示模式模拟的近地面水平风矢量. 由图 3(a), (b) 的模拟结果可以看出, 当日 18:00 北京大部分平原地区盛行风向为偏南风, 且越靠近北部山区风速越大. 这是夏季白天北京地区山谷风环流主导该地区近地面风场的结果. 东南部分地区盛行偏东风, 结合整个京津冀环渤海地区的水平风场可以发现, 这是夏季白天渤海海陆风环流深入该地区并影响近地面风场的结果. 同一时刻, 北京西北山区中, 山地北麓多为下坡风, 而山地南麓多为上坡风. 这主要是由于该时刻逐渐临近傍晚, 地面温度逐渐降低, 山谷风已经开始解体和转向. 山的背阴侧地面降温较早较快, 下坡风已经成型; 而山的向阳侧由于日间辐射能量剩余较多, 仍然维持山风风向. 这一山谷风转向时间差的存在, 使得山体南北两侧的热力驱动方向一致, 导致山谷风同向叠加加强, 由图 3 中可以得到证实. 在北京西北山地地区近地面空气受山谷热力差异的驱动和山谷地形动力强迫作用的共同影响, 形成了较为明显的泄流风. 对照图 3(a)和(b)的观测结果可知, MM5 和 WRF 对上述山谷风风向的

模拟结果, 均与 AWS 观测结果比较吻合. 另由图 3 可知, 此时北京市区范围存在强烈的近地面水平风场辐合, 其中心位于市中心偏西北. 这可能是城市热岛环流与背景山谷风主导风向耦合作用的结果. 与图 3 中相应位置的自动站观测结果进行比较, 发现除 54597 站以外, 其他各站点位置附近的风向都与模拟结果基本一致. 由于没有相应位置的自动站资料, 因此模拟图东南部分的偏东风无法用实测资料证实.

图 4 给出了 2007 年 8 月 15 日当地时间 20:00, 北京区域近地面风场的水平分布. 图 4(a)和(b)中的浅色箭头图分别是 MM5V3.7 和 WRFV2.2 的模拟结果, 深色圆点表示自动气象站点位置(具体站号站名见表 1 和图 1), 站点位置上的深色箭头表示相应站点该时刻的风场观测结果. 图中的灰色色阶表示地形高度, 箭头的长度和方向表示模式模拟的近地面水平风矢

量. 由图 4(a)和(b)可以看出, 当日 20:00 北京东南部平原地区盛行风向为偏东风, 结合整个京津冀环渤海地区的水平风场可以发现, 这是夏季傍晚渤海海陆风环流深入北京地区并主导该地区近地面风场的结果. 同一时刻, 北京西北山地下坡风较明显, 尤其是西山山脉的东麓, 由于下午到日落时分处于背阴面, 地面降温较其它地方更早更快, 因此此时下坡风已经较为旺盛. 与此相反山地向阳一侧的大部分地区此时山谷风刚刚发生转向, 谷风尚不明显. 对照图 4(a)和(b)中的观测结果可见, MM5 和 WRF 对上述海风和谷风的模拟结果, 均与 AWS 观测结果非常吻合. 由图 4(a), (b)可知, 此时山地地区的下坡风与平原地区的偏东风汇合, 两个模式均模拟出一条位于北京西北部山地平原结合地带的大致南北方向的水平风场辐合带, 辐合带的具体位置稍有差别. 这一结果与

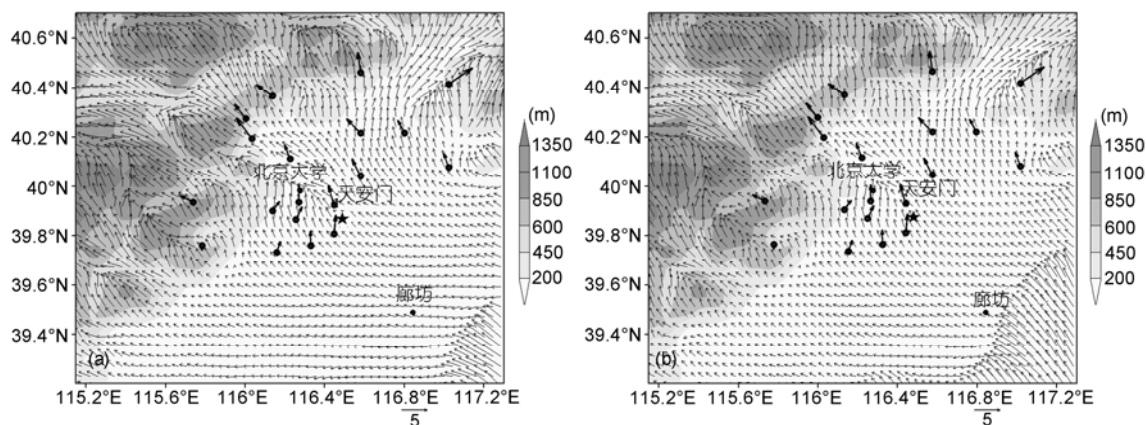


图 3 2007 年 8 月 15 日当地时间 18:00 北京区域近地面 10 m 风场水平分布

(a) MM5 模拟结果与自动站观测数据; (b) WRF 模拟结果与自动站观测数据

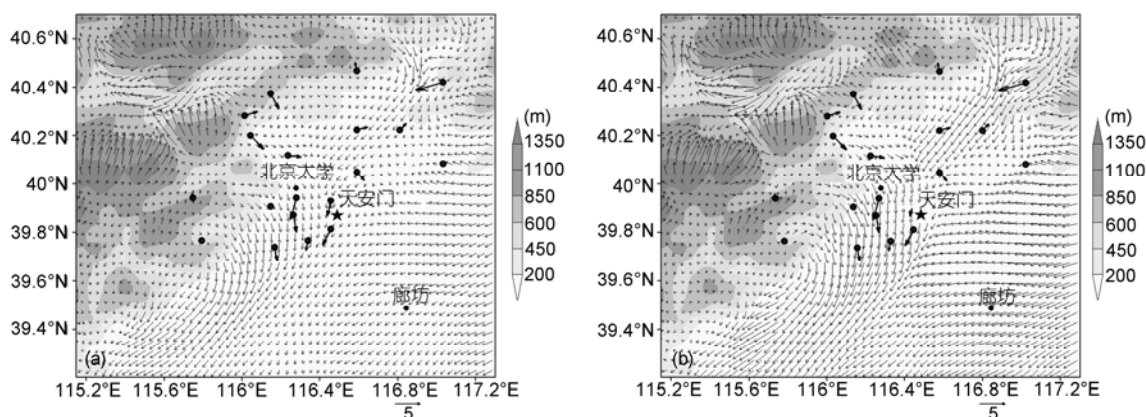


图 4 2007 年 8 月 15 日当地时间 20:00 北京区域近地面 10 m 风场水平分布

(a) MM5 模拟结果与自动站观测数据; (b) WRF 模拟结果与自动站观测数据

刘树华等^[1]、Hu 等^[4]和苏福庆等^[6]的实测资料分析和数值模拟研究所得出的结论一致. 谷风与海风辐合之后, 其水平分量形成较显著的偏北风, 这也与相应位置的自动站观测结果较为吻合. 另外由图 4 可知, 北京西北山区由于盛行谷风的存在, 一些狭长山谷中出现较为强盛的泄流风. 这与图 4 中 54409, 54499 和 54421 等站的观测结果较为吻合, 但是与 54410 站的观测结果差异较大.

2.2 近地面温度场模拟与观测结果对比分析

图 5 给出了 2007 年 8 月 15 日当地时间 20:00, 北京区域近地面温度场(T2m)区域分布情况. 图 5(a)和(b)中的等值线填充图分别表示 MM5 和 WRF 的模拟结果, 而圆圈以及里面的色彩则表示观测站的位置和相应站点处的观测结果. 由图 5(a)和(b)的模拟结果可以看出, 北京区域在当前时刻存在较为明显的城市热岛效应, 城郊温差大约 2~3℃. 城区与山地地区的最大温差约 8℃. 图 5(a)和(b)中自动站的观测结果大致与模拟结果吻合, 但仍有微小差别. 分别对比图 5(a)和(b)中的模拟和观测结果, 发现两种模式对市区温度的模拟比实测值偏低大约 2~3℃, 模拟得到的热岛高温中心也均比观测结果偏南约 0.3 个纬度.

对照图 5(a)和(b)可知, WRF 与 MM5 对北京西北部山地中的近地面温度场的模拟结果较东南方向平原地区更为一致. 这是因为对于北京西北部地区, 地形分布是近地面温度分布的最主要因素, 而 WRF 与 MM5 各自地形资料的精度保证了二者对山地区域中近地面温度分布模拟的趋势一致性. 另一方面, 本研

究中的参数化方案敏感性实验结果则进一步表明, 在东南部平原地区, 近地面温度对于模式中陆面参数化方案的选取较为敏感.

2.3 近地面温度日变化模拟与观测结果对比分析

图 6 给出了北京时间 2007 年 8 月 16 日 6:00 到 2007 年 8 月 19 日 6:00, 北京区域的三个自动站(位置和海拔高度见表 1)区域, 近地面 2 m 温度场(T2m)的模拟与观测结果时间序列比较图. 图中观测值来自相应位置的 AWS 自动气象站资料, 模拟结果则是分别将 WRF 和 MM5 模拟生成的格点结果插值到相应站点经纬度而生成. 插值方法采用二阶样条差值. 三个站点分别选取南郊、海淀和昌平, 分别代表城市近郊、城区和郊区县城.

由图 6 的三幅图中的观测结果可知, 图中所示时段内, 三个站点位置上每日最高气温出现在大约 14:00 左右, 而最低气温则出现在当天凌晨大约 2 点到 4 点. 并且海淀站(图 6(b), 54399)观测到的每日最低气温出现较其他两处稍早.

将三个站点处模拟结果与观测结果进行比较可知, 总体而言, 模拟结果与实际观测资料均吻合的较好, 最高最低气温出现时间与实测基本重合. 但是仍存在一些差异, 如图 6(b)和(c)中, MM5 模拟的每日温度比 WRF 的模拟结果观测结果更接近实测; MM5 中有较多的陆面方案可供选择, 对于当前所模拟的实例, Pleim-Xiu 方案^[24]调用了来自 TERRAIN 的陆地类型百分比和土壤数据集, 同时更精确地估算了地面水汽通量和加入土壤内水分垂直传输的物理模

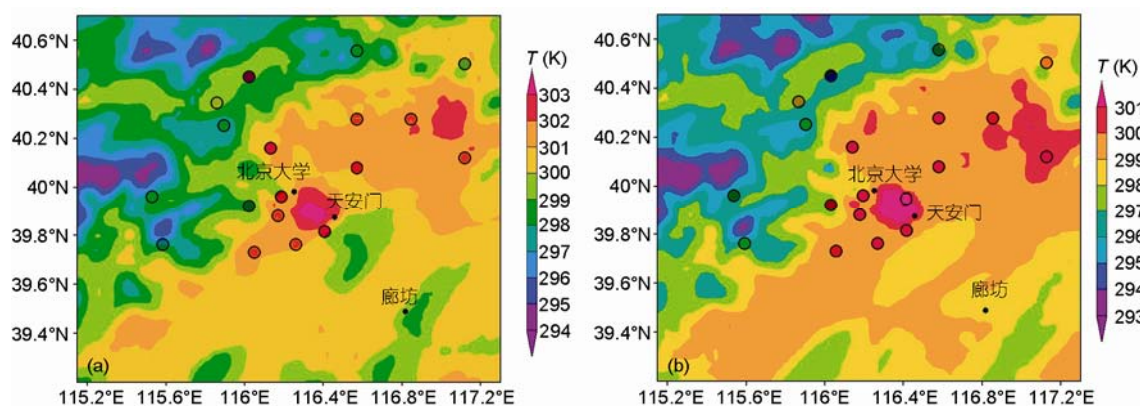


图 5 2007 年 8 月 15 日当地时间 20:00 北京区域近地面 2 m 温度场水平分布

(a) MM5 模拟结果与 AWS 站点观测值; (b) WRF 模拟结果与 AWS 站点观测值

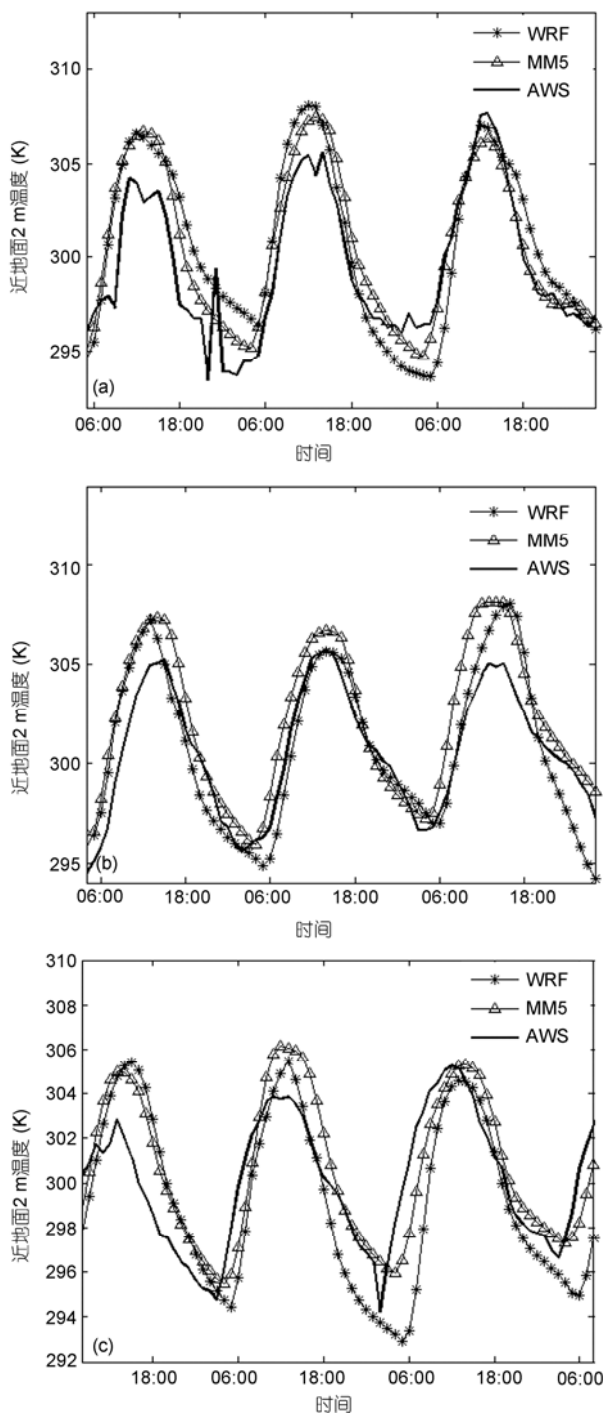


图6 2007年8月16~19日自动气象站附近区域近地面2m温度场的模拟与观测时间序列对比

(a) 观象台站(54511); (b) 海淀站(54399); (c) 昌平站(54499)

型, 这些改进使得MM5对地表温度地模拟更加精确. 图7给出了北京时间2007年8月16日6:00到

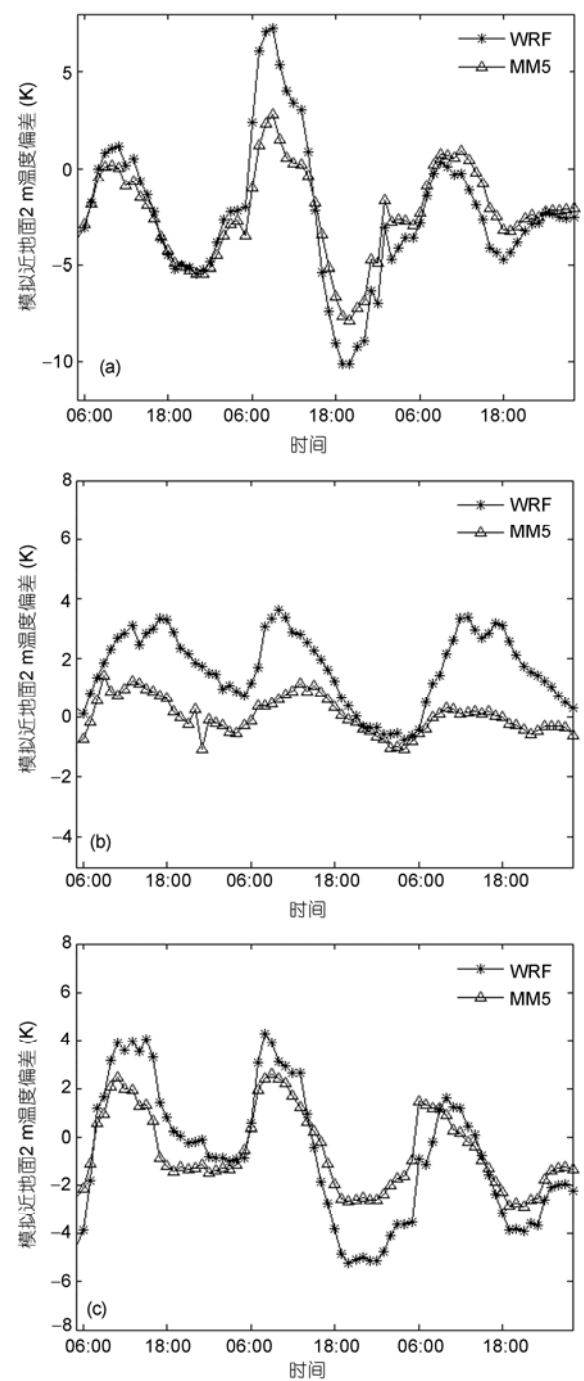


图7 2007年8月16~19日自动气象站附近区域近地面2m温度场的模拟与观测结果差值时间序列

(a) 观象台站(54511); (b) 海淀站(54399); (c) 昌平站(54499)

19日6:00, 北京区域内三个自动站附近, 地面2m处气温场模拟值与自动站观测值的差值时间序列, 即

T2m(WRF)-T2m(AWS)和T2m(MM5)-T2m(AWS), 与图 6 一一对应. 由图 7 可知, 总体而言, MM5 对 T2m 的模拟结果与自动站的实测数据的偏差比 WRFV2.2 更小, 这说明对于该时段 T2m 的模拟, MM5V3.7 比 WRFV2.2 的总体精度更高. 一方面观象台站(54511, 图 7(a))附近区域的模拟结果比另外两个站的精度更低(除 17 日 6:00 到次日 6:00 时段以外), 尤其是每天最高最低气温的偏差, 图 7(a)明显低于图 7(b)和(c)所示. 另一方面由图 7(b)可知, MM5 的模拟精度明显优于 WRF, 但是由于在两种模式均高估了日间地表温度, 低估夜间地表温度. 其中一个重要原因是两种模式中都没有充分考虑土壤水分垂直迁移对土壤温度的影响^[38]. 土壤中的水分白天由冷湿的深层向干热的浅层地表运动并通过被加温和蒸发降低地表温度; 夜晚则通过相反的过程加热地表. 但是城市地面的低比热容和不透水性使得该物理过程的强度明显减弱, 这就解释了模式对于城市区域的模拟虽然同样没有考虑该物理过程, 但是地面温度的模拟却相对较好的原因. 图 7(c)中模式与实测资料的偏差总体偏大, 模拟精度较低. 可能是由于两种模式对该郊区地面站的局地代表性较低所致. 站点局地代表性会显著地影响观测资料的质量以及模式结果与观测结果的一致性, 很多研究结果都支持这一点^[39,40].

2.4 近地面风速日变化模拟与观测结果对比分析

图 8 给出了北京时间 2007 年 8 月 16 日 6:00 到 2007 年 8 月 17 日 6:00, 北京区域的三个自动站(位置和海拔高度见表 1)附近, 地面 10 m 水平风速场(U10m, V10m 合成矢量)的模拟与实测结果时间序列比较图. 图 8 中 AWS 观测值来自相应位置的自动气象站资料, 模拟结果则是分别将 WRF 和 MM5 模拟生成的格点结果插值到相应站点经纬度而生成. 插值方法和选取的站点同图 6.

从图 8 中的 AWS 观测得到的风速时间序列可知, 总体来讲, 在图 8 中所示时段内, 三个站点位置上日间风速较大, 夜间风速较小. 最大风速出现在每天上午 11 点左右. 由图 8(a)和(b)还可以看出, 南郊站和昌平站附近区域, 风速日变化过程中还出现“双峰”现象, 即在一天之内, 近地面风速出现两次极大, 分别在上午 11 点左右和傍晚 20:00 左右, 下午 16~18 点之间风速稍稍回落, 但仍高于夜间. 但图 8(c)所示海淀站并未明显出现此现象.

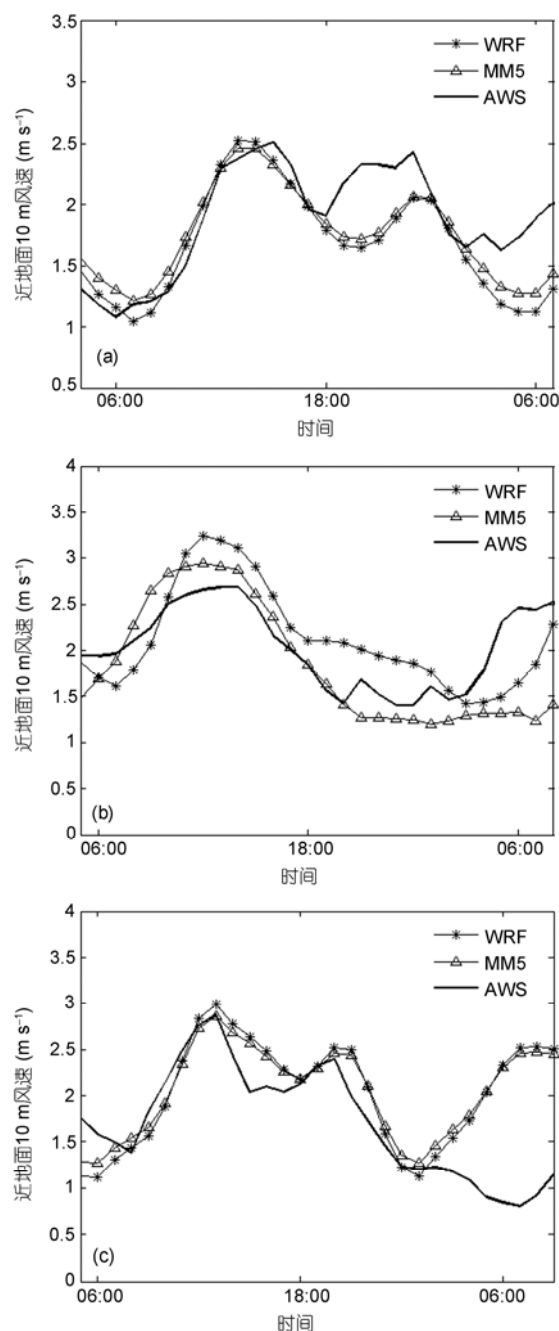


图 8 2007 年 8 月 16~17 日自动气象站附近区域 10 m 水平风场模拟与观测时间序列对比

(a) 观象台站(54511); (b) 海淀站(54399); (c) 昌平站(54499)

由图 8(a)南郊站模拟和观测值对比可见, 总体而言, WRF 与 MM5 的模拟结果与观测较为吻合. 但是模拟结果中风速日变化的波动范围较观测值大. 白天的两次风速极大, 模拟结果均比观测结果略高, 而

模拟夜间风速极小值也比实测值小。

图 8(b)显示海淀站附近的对比结果。由图可见, 两条模拟曲线在第一天的 18:00 之前, 总体高于观测结果, 这可能与测站周围的建筑物有关。次日凌晨 2:00 以后, 观测曲线显示该站附近风速显著增大。总体而言, 对于这一事件, 两条模拟曲线均未做出非常好的响应。但是 WRF 的模拟结果对此有较 MM5 更为明显的响应。

图 8(c)显示昌平站附近的对比结果。如图 8(c)所示, WRF 和 MM5 的模拟结果相当一致, 但是都与实测结果有较明显的区别。同时模拟风速在大多数时间内高于实测风速。对该地区进行的陆面参数化过程的数值敏感性实验结果也进一步证实了这个问题。对于这一结果, 我们猜测该地区的模拟误差很可能与参数化方案的选择无关。可能的原因包括该站点附近受到了较强的小尺度系统的影响, 而两个模式均无法捕捉到这样的小尺度系统; 或者是海淀站(54499)附近的地形, 建筑物等局地非气象因素导致该站的局地代表性降低, 从而导致模拟与实测结果有较大的差异。

图 9 给出了北京时间 2007 年 8 月 16 日 6:00 到 17 日 6:00, 北京区域内三个自动站附近, 地面 10 m 处水平风速模拟值与自动站观测值的差值时间序列, 即 $\text{Speed10m(WRF)} - \text{Speed10m(AWS)}$ 和 $\text{Speed10m(MM5)} - \text{Speed10m(AWS)}$, 与图 8 一一对应。与图 7 对比可知, 总体而言, 两种模式对风速的模拟精度略低于对近地面温度的模拟; 而由图 8 与图 9 的比较可知, 一方面 WRFV2.2 对于阵风的模拟精度略高于 MM5V3.7, 另一方面两种模式对于昌平站的模拟结果相当一致, 而与实测资料的偏差却较大。

2.5 MM5V3.7 与 WRFV2.2 模拟能力的统计检验

结合图 6~9, 我们对模拟与实测数据做进一步的对比分析。选取 2007 年 8 月 16~19 日, 南郊(54511)、海淀(54399)和昌平(54499)三个站点近地面 10 m 风速、风向, 以及近地面 2 m 温度的每小时模拟结果, 分别与对应的自动气象站观测资料进行对比统计。采用 Pearson 相关系数 r (Pearson Correlation Coefficient), 均方误差(MSE)和相对均方根误差(RMSE)三个变量作为统计检验指标, 并用统计软件 SPSSV12.0 完成。以此来验证和对比两种模式对同下垫面区域, 不同气象变量的模拟能力。其中,

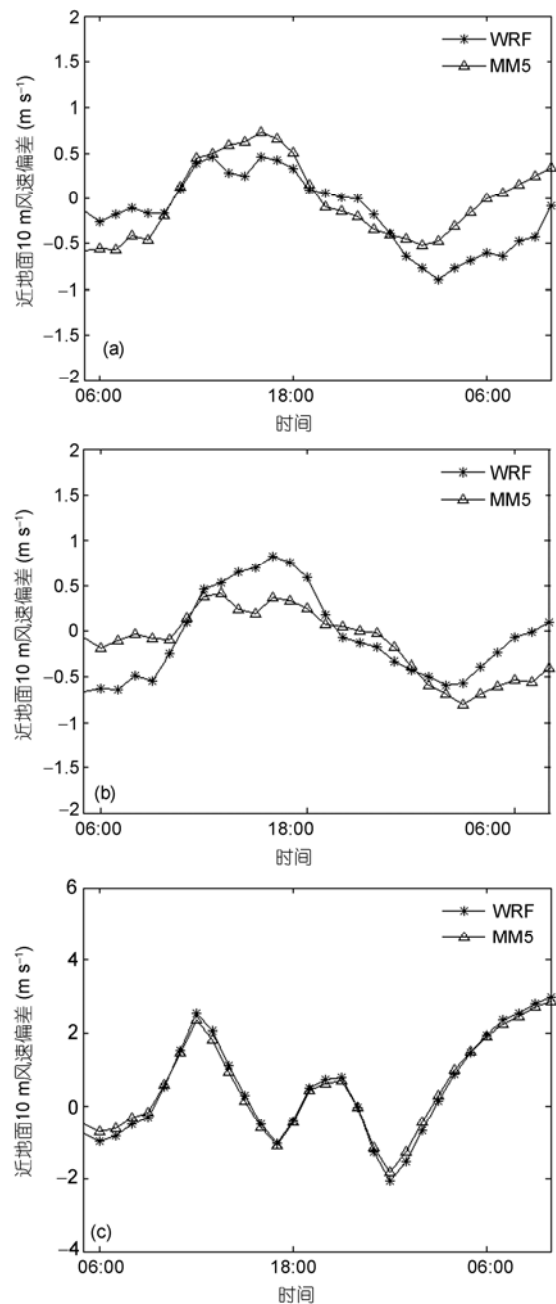


图 9 2007 年 8 月 16~17 日自动气象站附近区域 10 m 水平风场模拟与观测差值的时间序列

(a) 观象台站(54511); (b) 海淀站(54399); (c) 昌平站(54499)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

表 3 MM5 与 WRF 对部分气象变量模拟精度统计结果

变量名	相关系数		均方差		均方根差	
	MM5	WRF	MM5	WRF	MM5	WRF
风速(m s ⁻¹)	0.466	0.483	3.650	2.805	0.730	0.561
风向	0.409	0.411	19.711	17.245	0.109	0.096
2 m 温度 (K)	0.782	0.668	3.425	4.780	0.011	0.016

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (2)$$

$$RMSE = \frac{MSE}{\bar{Y}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}}{\bar{Y} \sqrt{n(n-1)}}, \quad (3)$$

式中, n 为数据时间序列的长度, X 代入模式输出数据, Y 代入 AWS 实测数据.

统计分析结果如表 3 所示. WRF 和 MM5 模拟的近地面温度与实测数据的相关系数, 高于近地面风速, 又高于近地面风向. 同时 WRF 和 MM5 模拟的近地面温度与实测数据的相对均方根误差, 则小于近地面风速, 近地面风向的相对均方根误差最大.

对于近地面温度, MM5 的模拟数据与 AWS 实测数据的相关系数(Correlation Coefficient)比 WRF 略高, 同时相对均方根误差(RMSE)也比 WRF 略小, 这表明 MM5 对近地面温度场的模拟能力较 WRF 略好, 这可能是由于 MM5 对地表热力过程的参数化描述较之 WRF 更为精细和准确. 而对于近地面风速和风向, WRF 的模拟数据与 AWS 实测数据的相关系数(Correlation Coefficient)比 MM5 略高, 同时相对均方根误差(RMSE)也比 MM5 略小, 这表明 WRF 对近地面温度场的模拟能力较 MM5 略好. 这可能是由于 WRF 的动力框架更有利于小尺度湍流扩散的描述和计算.

3 结论

通过以上 MM5V3.7 与 WRFV2.2 对北京低层大气中局地耦合环流模拟结果的实测资料对比分析和统计检验, 主要得到以下几方面的结论:

(1) WRF 与 MM5 对北京区域低层大气中山谷风环流, 海陆风环流的近地面风场结构以及转向过程, 城市热岛环流位置, 范围和日变化过程的模拟均较为成功, 与实测结果较为一致; 因此 WRF 与 MM5 具有对北京区域低层大气中局地耦合环流结构的模拟能力.

(2) 模式模拟结果对陆面过程和行星边界层方案等参数化方案的选取较为敏感. MM5 中由于有更完备的陆面参数化方案供选择, 因而由本文给出的对比研究以及之前的敏感性实验结果可知, MM5 对近地面温度场以及变化的模拟能力相对于 WRFV2.2 更加细致精确; 而 WRF 中更加合理的动力框架使得它对于对近地面风场, 有更好的模拟能力.

(3) 自动站观测数据的局地代表性对于模拟和实测资料的对比带来一定程度的负面影响, 影响了二者之间的一致性.

(4) 由于模式模拟尺度的限制两个中尺度模式对于阵风与小尺度天气系统背景下的近地面风场结构均无法有效地模拟和重现.

致谢 感谢北京大学大气科学系孟智勇老师在该文研究中的指导, 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

- 1 刘树华, 刘振鑫, 李炬, 等. 京津冀地区大气局地环流耦合效应的数值模拟. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 88–98
- 2 李晓莉, 毕宝贵, 李泽椿. 北京冬季城市边界层结构形成机制的初步数值研究. 气象学报, 2005, 63: 889–902
- 3 佟华, 陈仲良, 桑建国. 城市边界层数值模式研究以及在香港地区复杂地形下的应用. 大气科学, 2004, 28: 957–978
- 4 Hu X M, Liu S H, Wang Y C, et al. Numerical simulation of wind and temperature fields over Beijing area in summer. Acta Meteorol Sin, 2005, 19: 120–127
- 5 杨玉华, 徐祥德, 翁永辉. 北京城市边界层热岛的日变化周期模拟. 应用气象学报, 2003, 14: 61–68
- 6 苏福庆, 任阵海, 高庆先, 等. 北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统——边界层输送汇. 环境科学研究, 2004, 17: 21–23

- 7 Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Meso-scale Model (MM5). NCAR Technical Note. 1995
- 8 Ratnam J V, Kumar K K. Sensitivity of the simulated monsoons of 1987 and 1988 to convective parameterization schemes in MM5. *J Clim*, 2005, 18: 2724–2743
- 9 Reisner J, Rasmussen R M, Bruintjes R T. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 meso-scale model. *Quart J Royal Meteorol Soc*, 1998, 124: 1071–1107
- 10 Kotroni V, Lagouvardos K. Precipitation forecast skill of different convective parameterization and microphysical schemes: Application for the cold season over Greece. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 1977–1980
- 11 Angevine W M, Mitchell K. Evaluation of the NCEP meso-scale Eta Model convective boundary layer for air quality applications. *Monthly Weather Rev*, 2001, 129: 2761–2775
- 12 Chandrasekar A, Philbrick C R, Clark R, et al. Evaluating the performance of a computationally efficient MM5/CALMET system for developing wind field inputs to air quality models. *Atmos Environ*, 2003, 37: 3267–3276
- 13 Grell G A, Emeis S, Stockwell W R, et al. Application of a multiscale, coupled MM5/chemistry model to the complex terrain of the VOTALP valley campaign. *Atmos Environ*, 2000, 34: 1435–1453
- 14 Jackson B, Chau D, Gurer K, et al. Comparison of ozone simulations using MM5 and CALMET/MM5 hybrid meteorological COOS fields for the July/August 2000 episode. *Atmos Environ*, 2006, 40: 2812–2822
- 15 Mao Q, Gautney L L, Cook T M, et al. Numerical experiments on MM5-CMAQ sensitivity to various PBL schemes. *Atmos Environ*, 2006, 40: 3092–3110
- 16 Miao J F, Chen D, Wyser K, et al. Evaluation of MM5 meso-scale model at local scale for air quality applications over the Swedish west coast: Influence of PBL and LSM parameterizations. *Meteorol Atmos Phys*, 2008, 99: 77–103
- 17 Shafran P C, Seaman N L, Gayno G A. Evaluation of numerical predictions of boundary layer structure during the Lake Michigan Ozone Study. *J Appl Meteorol*, 2000, 39: 412–426
- 18 Berg L K, Zhong S Y. Sensitivity of MM5-simulated boundary layer characteristics to turbulence parameterizations. *J Appl Meteorol*, 2005, 44: 1467–1483
- 19 Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Rev*, 2001, 129: 569–585
- 20 Lin W S, Wang A Y, Wu C S, et al. A case modeling of sea-land breeze in Macao and its neighborhood. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18: 1231–1240
- 21 Miao J F, Chen F, Wyser K. Modelling subgrid scale dry deposition velocity of O₃ over the Swedish west coast with MM5-PX model. *Atmos Environ*, 2006, 40: 415–429
- 22 Perez C, Jimenez P, Jorba O, et al. Influence of the PBL scheme on high-resolution photochemical simulations in an urban coastal area over the Western Mediterranean. *Atmos Environ*, 2006, 40: 5274–5297
- 23 Betts A K, Chen F, Mitchell K E, et al. Assessment of the land surface and boundary layer models in two operational versions of the NCEP Eta Model using FIFE data. *Monthly Weather Rev*, 1997, 125: 2896–2916
- 24 Hanna S R, Yang R X. Evaluations of meso-scale models' simulations of near-surface winds, temperature gradients, and mixing depths. *J Appl Meteorol*, 2001, 40: 1095–1104
- 25 Zhong S Y, In H J, Bian X D, et al. Evaluation of real-time high-resolution MM5 predictions over the Great Lakes region. *Weather Forecast*, 2005, 20: 63–81
- 26 Xiu A J, Pleim J E. Development of a land surface model. Part I: Application in a meso-scale meteorological model. *J Appl Meteorol*, 2001, 40: 192–209
- 27 殷达中, 陈家宜. 一个陆面过程参数化模式与 MM5 的耦合. *大气科学*, 2000, 24: 177–186
- 28 Michalakes J, Dudhia J, Gill D, et al. Design of a next-generation regional weather research and forecast model. NCAR Technical Note. 2001
- 29 Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, et al. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmos Environ*, 2005, 39: 6957–6975
- 30 Grell G A, Emeis S, Stockwell W R, et al. Application of a multiscale, coupled MM5/chemistry model to the complex terrain of the VOTALP valley campaign. *Atmos Environ*, 2000, 34: 1435–1453
- 31 陈炯, 王建捷. 北京地区夏季边界层结构日变化的高分辨模拟对比. *应用气象学报*, 2006, 17: 403–411
- 32 缪国军, 张镭, 舒红. 利用 WRF 对兰州冬季大气边界层的数值模拟. *气象科学*, 2007, 27: 169–175
- 33 Welsh P, Wildman A, Shaw B, et al. Implementing the Weather Research and Forecast (WRF) model with local data Assimilation at NWS

- WFO Jacksonville Florida. In: 20th Conference on Weather and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction: Seattle, Washington, USA, 2004. 11–15
- 34 Jorba O, Loridan T, Jimenez-Guerrero P. Linking the advanced research WRF meteorological model with the Chimere chemistry- transport model. *Environ Model Software*, 2008, 1: 1–3
- 35 Zhong S Y, Fast J. An evaluation of the MM5, RAMS, and Meso-Eta models at subkilometer resolution using VTMX field campaign data in the Salt Lake Valley. *Monthly Weather Rev*, 2003, 131: 1301– 1322
- 36 刘宁微, 王奉安. WRF 和 MM5 模式对辽宁暴雨模拟的对比分析. *气象科技*, 2006, 34: 364–369
- 37 蒙伟光, 闫敬华, 扈海波. 城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响. *大气科学*, 2007, 31: 364–376
- 38 代成颖, 高志球, 王琳琳, 等. 两种土壤温度算法的对比分析. *大气科学*, 2009, 33: 135–144
- 39 Alapaty K, Raman S, Niyogi D. Uncertainty in the specification of surface characteristics: A study of prediction errors in the Boundary Layer. *Boundary-Layer Meteorol*, 1997, 82: 475–502
- 40 Niyogi D, Raman S, Alapaty K. Uncertainty in specification of surface characteristics. Part 2: Hierarchy of interaction explicit statistical analysis. *Boundary-Layer Meteorol*, 1999, 91: 341–366