

马红云, 郭品文, 宋洁. 2009. 耦合不同陆面方案的 WRF 模式对 2007 年 7 月江淮强降水过程的模拟 [J]. 大气科学, 33 (3): 557–567. Ma Hongyun, Guo Pinwen, Song Jie. 2009. Simulation of “2007. 7” heavy rainfall case in the Changjiang-Huaihe valley using the WRF model with different land surface schemes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 557–567.

耦合不同陆面方案的 WRF 模式对 2007 年 7 月 江淮强降水过程的模拟

马红云¹ 郭品文¹ 宋洁^{1, 2}

¹ 气象灾害省部共建教育部重点实验室 南京信息工程大学, 南京 210044

² 北伊利诺州大学地理系, 美国伊利诺州 60115

摘 要 利用 WRF 模式, 分别选用不同陆面参数化方案 (SLAB、RUC、NOAH、UCM) 对 2007 年 7 月 7~8 日的江淮暴雨进行数值模拟试验, 模拟结果的对比分析表明: 虽然主要雨带的基本位置和大致走向受陆面方案的影响并不大, 但是降水强度的分布对陆面物理过程是敏感的, 耦合陆面方案比不耦合陆面方案的模拟效果更接近实况; 不同陆面方案模拟的降水量均较实况偏小, 然而由于考虑的要素和物理过程存在一定差异, 它们对降水的中心落点、雨量值、降水日变化、降水类型以及降水条件的模拟各有所长; 特别值得指出, TRMM 资料与 4 种方案的模拟结果均反映出本次降水日变化过程中夜间的峰值特征, 这是短时降水 (1~3 h) 和持续性降水 (≥ 6 h) 的综合反映, 而凌晨后的降水则主要由持续性降水造成; 在各种试验的综合比较中, NOAH 方案较其他方案的模拟结果显得更稳定与合理, UCM 方案针对城市下垫面的模拟有一定优越性。

关键词 WRF 模式 暴雨模拟 陆面方案 城市下垫面

文章编号 1006-9895 (2009) 03-0557-11

中图分类号 P426

文献标识码 A

Simulation of “2007. 7” Heavy Rainfall Case in the Changjiang-Huaihe Valley Using the WRF Model with Different Land Surface Schemes

MA Hongyun¹, GUO Pinwen¹, and SONG Jie^{1, 2}

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

² Department of Geography, Northern Illinois University, IL 60115, USA

Abstract The new generation mesoscale model WRF is used to simulate heavy rainfall in the Changjiang-Huaihe valley during 7–8 July 2007, and the precipitation sensitivity to land surface parameterization schemes is tested. All sensitivity simulations are initialized with NCEP-FNL data ($1^\circ \times 1^\circ$). The results show that the simulated precipitation patterns from the WRF model generally agree with the observations, and the sensitivity of the precipitation simulation to the land surface physical process is distinct. Coupling the surface process parameterization scheme can improve the precipitation simulation significantly. However, the simulated precipitation with different schemes is lower than the observed precipitation, and details of simulated precipitation patterns, amount, diurnal variation and precipitation types are different among the land surface parameterization schemes. Comparing all results of precipitation

收稿日期 2007-10-18, 2008-02-03 收修定稿

资助项目 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室 (原江苏省气象灾害重点实验室) 开放课题 KLME0507、KLME0703

作者简介 马红云, 女, 1976 年出生, 博士研究生, 主要从事中尺度模式、陆面物理过程的研究。E-mail: mhypony@126.com

simulation with different land surface parameterization schemes, NOAH scheme gives more reasonable results than the others, and when the simulated domain is urban, UCM scheme is superior to the others. Sensitivity experiments indicate that understanding and appropriately using land surface parameterization schemes are necessary to enhance the modeling capability.

Key words WRF model, heavy rainfall simulation, land surface parameterization scheme, urban surface

1 引言

陆地表面是由结构多样、性质复杂、分布极不均匀的下垫面所组成的,是大气下边界中一个既重要又复杂的部分。陆面与大气及其他圈层之间进行的各种时空尺度的相互作用,以及动量、能量、水汽等物理量的交换和辐射传输对于大气环流及气候状况产生极大的影响。许多研究工作表明陆面的地表特征,物理和生化过程对中长期天气及气候变化的影响是很重要的(Manabe, 1969; Laval et al., 1986; 刘永强等, 1992a, 1992b; Vemekar et al., 1995; 薛永康等, 1998; Li et al., 2001; 布和朝鲁等, 2002; 包庆等, 2006; 林朝晖等, 2008),但是对短期天气过程尤其是对降水过程影响的研究还很少(Changnon, 1979; 周天军等, 1996a; Chen et al., 1997; Baker et al., 2001)

利用高分辨率的中尺度气象模式模拟区域降水过程,是目前研究降水事件的主要方法(Davison et al., 1998; Craig et al., 2002; 张曼等, 2006; 王欢等, 2006; 孙晶等, 2007; 王婷等, 2008)。关于数值模式中物理方案选用的讨论已有不少研究工作(Molinari et al., 1992; Kusaka et al., 2005; 赵鸣等, 2006)。王建捷等(2001)对 MM5 (The Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model) 模式中不同对流参数化方案进行了对比试验,发现各方案下模拟的水平环流特征有较好的一致性,但模拟的云物理特征和垂直运动特征存在一定差别;陈炯等(2006)讨论了边界层参数化方案对降水预报的影响,指出在中尺度数值模式 WRF (Weather Research and Forecasting Model) 中采用边界层方案比不采用的模拟效果好,并且 MYJ (Mellor-Yamada-Janjic scheme) 方案与 MRF (Medium Range Forecast scheme) 方案相比并没有明显的优越性;Jankov et al. (2004) 进行了不同物理方案的比较,认为在 WRF 模式中边界层方案和微物理方案对弱降水的敏感性是相当的,而对于强降水,微

物理方案较敏感。然而,数值模式中描述云的形成,大气边界层温度、湿度、风廓线等信息的准确性主要都依赖于下垫面的土壤植被等温湿特征。因此,在中尺度模式中选用合适的陆面方案,对提高模式的预报性能也非常重要。

本文利用 WRF 模式,对发生在 2007 年 7 月 7~8 日的一次江淮地区强降水过程进行模拟,以期进一步了解和认识 WRF 模式中不同陆面方案的性能、特点,以及对降水的影响程度,为合理选择和使用模式中的陆面参数化方案提供一些依据。

2 WRF 模式中陆面方案简介

由美国环境预测中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)等联合开发的新一代中尺度数值天气预报模式——WRF 模式,在当前的短期天气预报和研究中得到了广泛应用。WRF 模式与前一代中尺度数值预报模式 MM5 相比,考虑了比较详细的陆面过程,能描述不同下垫面的热量、水分等的传输过程,并将其耦合到边界层参数化模式中,加强了边界层物理过程的模拟,进而完善了整个模式的模拟性能(Joseph, 2004)。

WRF2.2 版为用户提供了 3 套陆面方案:(1) SLAB 方案(Dudhia, 1996),即 5 层土壤热扩散方案,该方案可以描述包括辐射、感热、潜热等在内的能量平衡,但是未考虑植被作用及一些物理量随时间变化的影响;(2) NOAH 方案(Chen et al., 2001),是基于俄勒冈州立大学的 OSU 陆面模式发展而来,考虑了植被、土壤、积雪等下垫面情况,并描述了与此相关的能量及水分收支过程,Kusaka et al. (2001, 2004) 考虑到城市下垫面的影响,在 2006 年底推出的最新版 WRF2.2 中设计了 Urban Canopy Model (UCM) 城市方案,并成功与 NOAH 方案耦合,这为研究城市气象的用户提供了选择;(3) RUC 方案(Smirnova et al., 1997, 2000),采用了美国国家海洋及大气管理局(NOAA)使用的 RUC (Rapid Update Cycle) 模式中的陆面方案,

该方案含有 6 层土壤方案和 2 层积雪方案, 并较细致地考虑了冻土与雪盖在能量及湿度输送过程中的影响。

3 试验设计

3.1 个例选取

2007 年 6 月 19 日江淮流域进入梅汛期, 7 月 24 日出梅, 整个梅雨期内降水主要集中在淮北地区、江淮之间北部及苏南西部, 持续时间长, 降水集中, 暴雨过程频繁, 强度大。其中, 7 月 7 日至 8 日安徽北部, 江苏省沿江和江淮之间受梅雨锋和低层切变线影响出现区域性暴雨和大暴雨, 部分地区的 24 小时累积降水量超过 150 mm, 因暴雨造成的灾害十分严重。本次暴雨过程是典型的梅雨锋暴雨, 主要暴雨落区的下垫面情况具有中国东部区域用地类型的代表性, 是处于正在快速发展的城市群地区, 应该说对应用 WRF 模式进行不同陆面参数化方案对降水影响的对比试验和分析是合适的、有代表性的, 特别是可以考察城市方案 (UCM) 对城市集中区域的天气模拟状况。

3.2 模拟设计

采用由 NCAR 数据支持部 (Data Support Section, DSS) 提供的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 每日 4 次的 NCEP-FNL 全球分析场资料作为初始场。WRF 模式的水平网格距设为 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$, 垂直层次为 27 层。微物理过程选用 Lin 方案, 长波辐射选用 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) 方案, 短波辐射采用 Dudhia 方案, 近地面层采用 MYJ 方案, 边界层选用 MYJ 方案, 积云对流采用 Grell 方案。陆面过程分为不耦合陆面方案 (简称 NOSFC 方案)、耦合 SLAB 方案、耦合 RUC 方案、耦合 NOAH 方案、耦合 NOAH 与 UCM 方案 (以下简称 UCM 方案), 分别对本次江淮强降水过程作模拟试验。模式初始时间为 6 日 06 时 (国际协调时, 下同), 积分时间为 48 小时, 每 1 小时输出一次预报结果。本文在以下分析中, 将 7 日 00 时~8 日 00 时作为一次完整的降水过程分析。另外, 本次试验中 WRF 模式使用了美国地质调查局 (USGS) 1993 年提供的 1 km 分辨率的土地利用 (LANDUSE) 资料, 由于该资料已经不能较贴切地反映目前全球城市化进程下的城市覆盖情况, 因此对试验区内的城市覆盖率作了适当调整。

4 试验与分析比较

4.1 24 小时总降水对陆面过程参数化方案的敏感性

图 1 给出 24 小时 (7 月 7 日 00 时~8 日 00 时) 累积总降水实况 (文中所用实况资料由江苏省气象台提供) 和模拟结果。如图 1a 所示, 实际降雨带呈东西向分布, 主要降雨区位于 ($30^{\circ}\text{N} \sim 34^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} \sim 122^{\circ}\text{E}$) 区域内, 降水大值中心位于 (32°N , 120°E) 附近, 雨量值达到 100 mm 以上; 在其西侧有一个雨量较小的中心, 位置在 (32.5°N , 116.5°E) 附近。图 1b~f 给出 5 种试验方案下模拟的 24 小时总降水量分布, 对比实况 (图 1a) 可以发现, 在 WRF 模式中耦合陆面方案显然比不耦合陆面方案更能描述实际降水特征, 对于主要雨带位置、走向的模拟也更接近实况。但是, 不同陆面参数化方案对暴雨中心落点和降水强度的模拟还存在一定的差异。

当不耦合陆面方案 (NOSFC 方案) 时 (图 1b), 主要雨区明显收缩, 降水强度显著减弱。耦合陆面方案后, 降水强度分布明显与观测结果更接近了。由此可见, 尽管陆面过程不直接产生降水, 但是通过与其他物理过程的耦合, 对降水会产生一定影响。4 种耦合陆面方案的试验所模拟的降水量均较实况偏小, 这可能因为试验所采用的分辨率对局地较小尺度系统的模拟能力有限, 然而提高模式分辨率后 (至 10 km), 虽然降水量与实况接近, 但产生较多虚假降水区域, 不能真实反映实况降水分布, 故舍弃。此外, 降水量偏小可能与其他物理过程选用的参数化方案有关。就耦合陆面方案的试验而言, 除了 SLAB 方案未能较好体现出 24 小时累积降水分布的两个大值中心外, 其他方案均有所反映。从最大降水量看, SLAB 方案的极值降水最大, 其次是 RUC 和 UCM 方案, NOAH 方案最小。

为了客观分析各试验对 24 小时总降水量模拟的效果, 在主要降雨带 ($30^{\circ}\text{N} \sim 34^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} \sim 122^{\circ}\text{E}$), 以及东部强降水区域 ($31^{\circ}\text{N} \sim 34^{\circ}\text{N}$, $118^{\circ}\text{E} \sim 121^{\circ}\text{E}$) 和西部强降水区域 ($31^{\circ}\text{N} \sim 34^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\text{E} \sim 118^{\circ}\text{E}$) 内分别将各种试验的模拟场与实况场作相关分析, 并对主要降雨带内的降雨量做误差分析。相关系数可以反映出模拟场与实况场降水分布的相似性, 平均绝对误差则能估量模拟值可能的误差范围。将模拟场与实况场的分辨率统一为

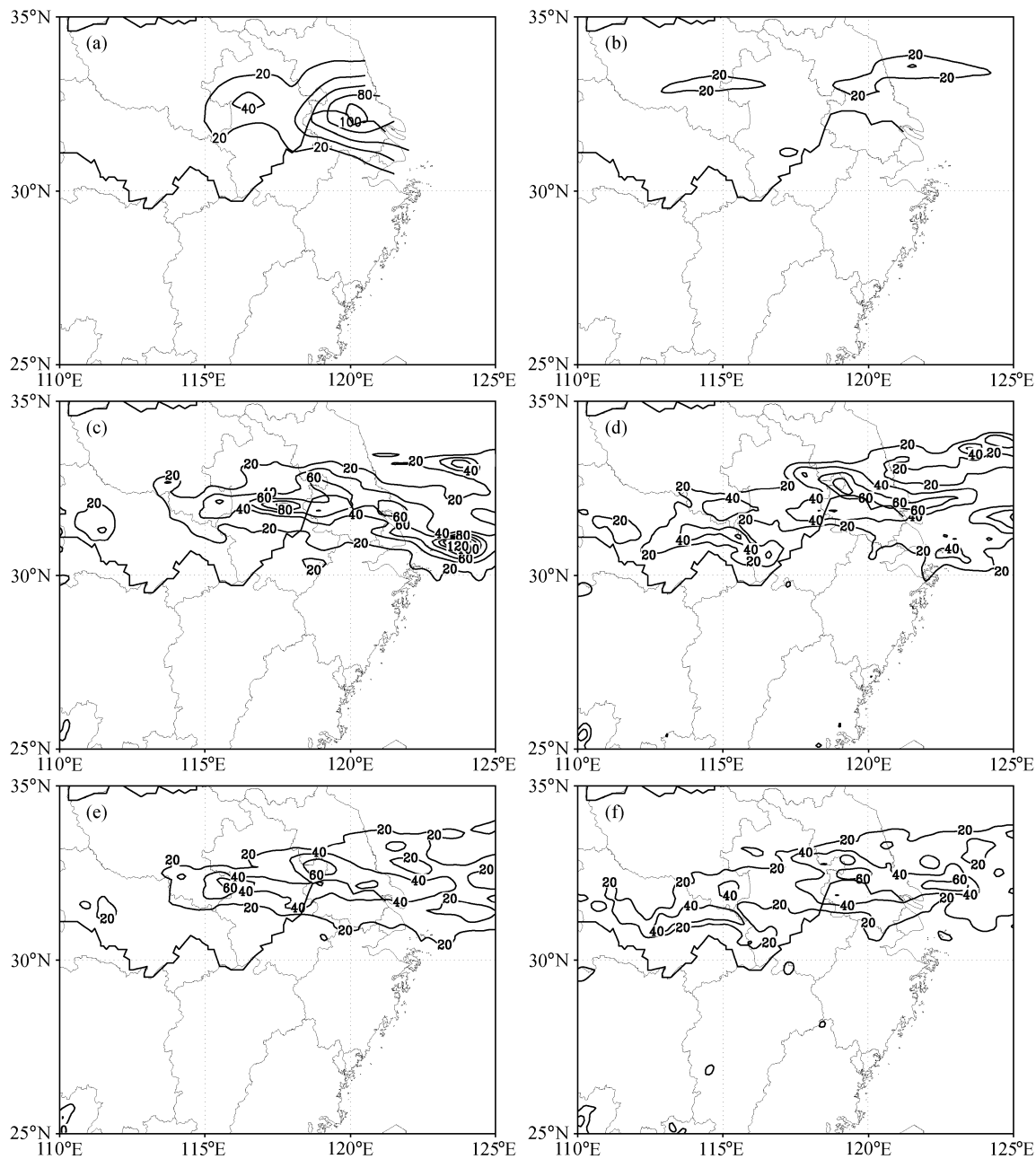


图1 江淮流域 2007 年 7 月 7 日 00 时~8 日 00 时的 24 小时累积降水量实况和 5 种试验模拟结果比较 (单位: mm): (a) 实况; (b) 选用 NOSFC 方案; (c) 耦合 SLAB 方案; (d) 耦合 RUC 方案; (e) 耦合 NOAH 方案; (f) 耦合 UCM 方案

Fig. 1 Observed and simulated 24-h rainfall (mm) from 0000 UTC 7 Jul to 0000 UTC 8 Jul 2007: (a) Observation; (b) NOSFC scheme; (c) SLAB scheme; (d) RUC scheme; (e) NOAH scheme; (f) UCM scheme

$0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 分析结果如表 1 所示。在主要降雨带内, 各试验的模拟场与实况场所求得相关系数均通过 0.05 的显著性检验, 即模拟场能基本反映出实况降水分布, 其中 NOAH 方案的相关性最高, 这说明耦合 NOAH 方案的试验较其他试验在模拟降水分布方面更合理。另外, UCM 方案对东侧降水

中心模拟较理想, NOAH 方案则对西侧的次级降水中心模拟较好。从降水量误差来看, 所有试验模拟的降水量平均绝对误差都较大, 误差范围 ≥ 10 mm。降水量模拟一直是比较困难的工作, 特别是极值降水, 能否较准确的模拟出实况降水量, 有待对模式进行更深入了解与探讨。

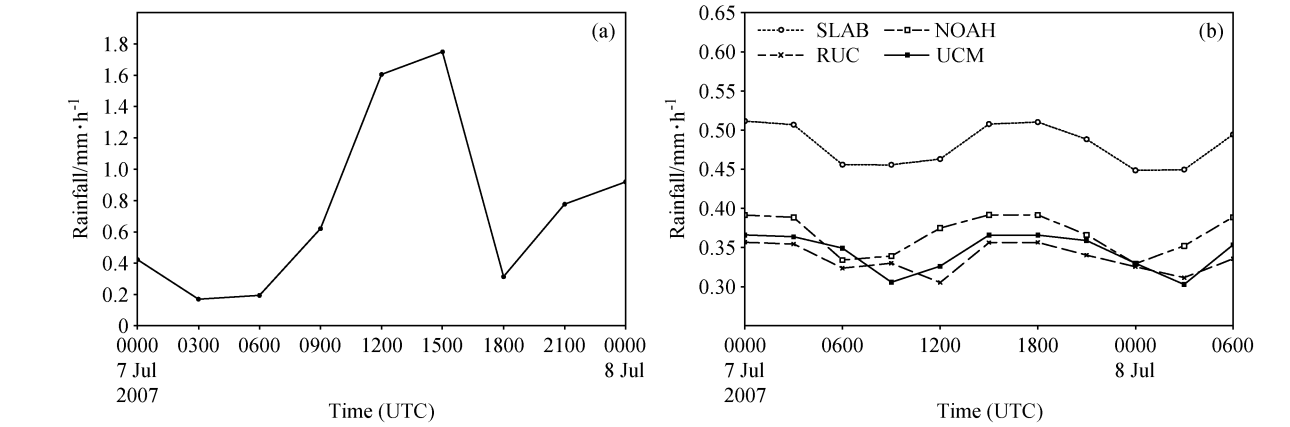


图 2 区域平均的 TRMM 观测降水日变化和模拟降水日变化的比较：(a) TRMM 观测；(b) 模拟结果
Fig. 2 Diurnal variations of (a) TRMM observed and (b) simulated precipitation averaged over domain (30°N–34°N, 110°E–120°E)

表 1 5 种试验下 24 小时总降水量模拟场与实况场的相关分析和误差分析结果

Table 1 The correlation coefficients and mean absolute errors of 24-h rainfall between simulations of 5 schemes and observation

试验名称	相关系数			平均绝对误差/mm
	(30°N~34°N, 110°E~122°E)	(31°N~34°N, 118°E~121°E)	(31°N~34°N, 115°E~118°E)	
NOSFC	0.26	0.044	0.16	14.6
SLAB	0.66	0.57	0.49	11.9
RUC	0.71	0.72	0.39	11.7
NOAH	0.78	0.70	0.69	10.0
UCM	0.73	0.78	0.58	11.4

将 24 小时累积降水分成前 12 小时和后 12 小时，以观察降水中心的位置移动（图略）。由观测得出，前 12 小时的主要降水集中在江苏中部地区，后 12 小时该降水中心东移入海，而其西侧的安徽中北部地区的降水逐渐加强。5 种试验结果对这一降水中心的移动都有所反映，其中以 NOAH 方案模拟效果最好。

4.2 降水日变化过程对陆面参数化方案的敏感性

近年来热带测雨卫星（Tropical Rainfall Measuring Mission，简称 TRMM）星载降水雷达（Precipitation Radar，简称 PR）的使用为研究降水的日变化提供了较可靠的数据资料（Sorooshian et al., 2002；Nesbitt, 2003）。降水日变化作为降水变化的最基本形式，已经成为检验一个数值模式正确性的关键，正确地模拟降水日变化的振幅和位相可以为数值模式参数化提供理想的试验基础。图 2a 为 TRMM 卫星资料 3B42RT（水平分辨率为 0.25°×0.25°经纬度，时间分辨率为 3 h 一次，每天共 8 个时次）提供的 7 月 7 日 00 时~8 日 00 时区域平均（30°N~34°N, 110°E~122°E）降水演变过程：7 日

03 时降水达到一天中的最低值，随后逐渐增强，降水峰值出现在 7 日 12~15 时，然后降水迅速减弱，18 时后又开始逐渐增加。4 种耦合不同陆面方案（以下试验比较中，鉴于不耦合陆面过程的试验模拟效果较差，故不再考虑该试验）模拟的降水日变化特征的整体演变形式与 TRMM 资料较接近（见图 2b），但从位相上看均比卫星资料滞后约 3~6 小时，可能与模式中形成降水的云物理过程需要一定的响应时间有关系。各方案模拟的降水振幅均偏弱，这可能因为各种陆面方案模拟的降水量均较实况偏小，此外，大范围的区域平均也会降低降水振幅强度。不同试验之间降水日变化的振幅和位相存在一定差异，其中 SLAB 和 NOAH 方案模拟的降水演变形式比较一致，比 RUC 和 UCM 方案在位相上更接近卫星观测形式。值得指出的是，TRMM 资料和试验模拟反映的降水单峰结构，与 Yu et al. (2007a) 利用多年台站观测资料研究发现的双峰观测结果不同，一方面可能由于 TRMM 卫星资料与实际台站观测资料是有出入的，另一方面

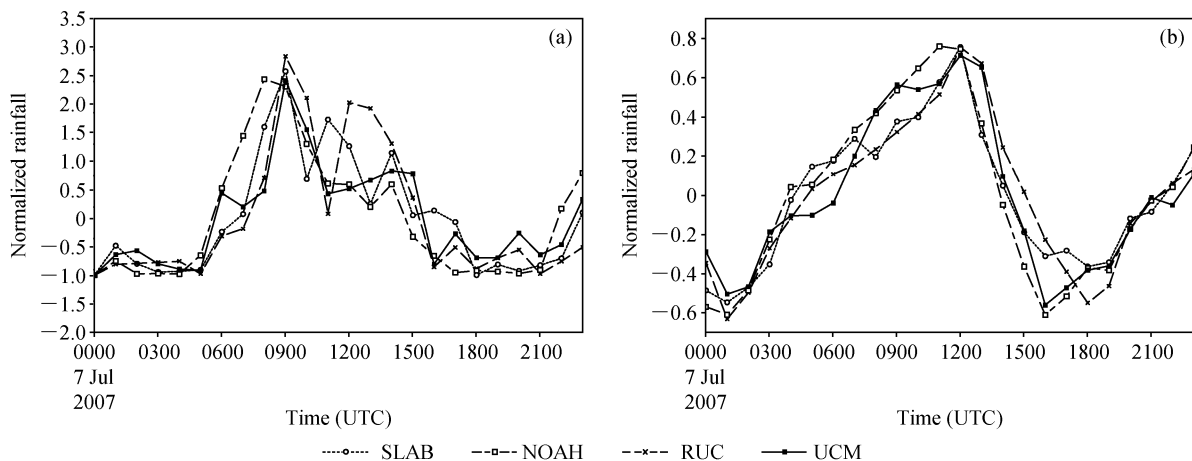


图3 不同陆面方案模拟的降水事件的日变化比较: (a) 1~3 h降水事件的日变化; (b) ≥ 6 h降水事件的日变化

Fig. 3 Diurnal variations of simulated rainfall events with different schemes: (a) Durations of 1–3 hours; (b) durations of more than 6 hours

由于模式本身对降水过程模拟可能还不够完善,此外,本文仅为一次降水个例,可能与气候平均态有不同。由此可见,降水的日循环问题是比较复杂的,值得进一步深入研究。

为了进一步讨论陆面方案对降水日变化中不同降水事件[定义和分析方法来自Yu et al. (2007b)]的影响,按降水持续时间长短将降水事件分为短时降水(1~3 h)和持续性降水(≥ 6 h),针对不同降水事件对区域内($30^{\circ}\text{N}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$)所有格点进行普查,将发生该类降水事件的格点的逐时降水量进行标准化后,再对整个区域进行平均(仅包括发生指定降水事件的格点),以方便比较不同试验模拟的降水事件的日变化形式。图3显示出不同陆面方案对短时降水事件的敏感性较持续性降水事件强。短时降水(图3a)在一天中可以发生多次,不同方案的模拟结果在位相上存在差异。持续性降水(图3b)主要发生在7日06~14时,18时以后又出现增强趋势,各种方案的模拟结果较一致;短时降水有很强的时间性和空间性,因此会增强模拟的敏感性,而持续性降水主要是大时空尺度的降水现象,故降低了模拟的不确定性。从降水事件的振幅形式和位相来看,本次降水过程中,江淮地区夜间(1200UTC~1500UTC)降水峰值的形成是短时降水和持续性降水的综合反映,而凌晨(1800UTC)后降水的维持主要是由持续性降水造成。

4.3 对流尺度降水和网格尺度降水对陆面过程参数化方案的敏感性

图4给出了各方案模拟的对流性降水与网格尺

度降水之间的比较,如图所示,对流性降水主要集中在江苏省中部和安徽省中北部的部分地区,网格尺度降水的分布较对流性降水分布广。其中,SLAB和NOAH方案的对流性降水分布比RUC和UCM方案的分布更向西延伸,但是网格尺度降水的分布较后两者范围小。SLAB是所有方案中模拟出更多、更强对流性降水信息的方案,这与其模拟最大降水值高于其他方案的结果较为一致。

为了定量分析几种陆面过程参数化方案模拟的对流性降水贡献情况,依次对4种方案在主要降水区域($30^{\circ}\text{N}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$)内求算了对流性降水占总降水比例的平均值(表略)。由计算结果可知,SLAB方案模拟的对流性降水占总降水的比例最高,达到28%,其他依次为:NOAH方案26.8%、RUC方案20.2%、UCM方案18.9%。虽然强降水的发生与对流系统密切相关,然而在本次模拟结果中,对流性降水占总降水比例不超过30%,值得指出的是,模式的分辨率为20 km,对流过程可能有部分被网格尺度所描述(周天军等,1996b),因此,各试验中对流性降水占总降水的比例均不高。

4.4 对影响系统以及动力和水汽条件的模拟比较

在7日00时200 hPa南亚地区上空的对流层高层存在一个庞大的高压系统(图略),高压的东北侧为西北偏西风的急流区,与底层位于西太平洋副热带高压西北侧的西南风低空急流形成有利于附近垂直环流出现的高低空配置(图略)。500 hPa亚洲中高纬地区呈两槽一脊型,位于贝加尔湖的低压

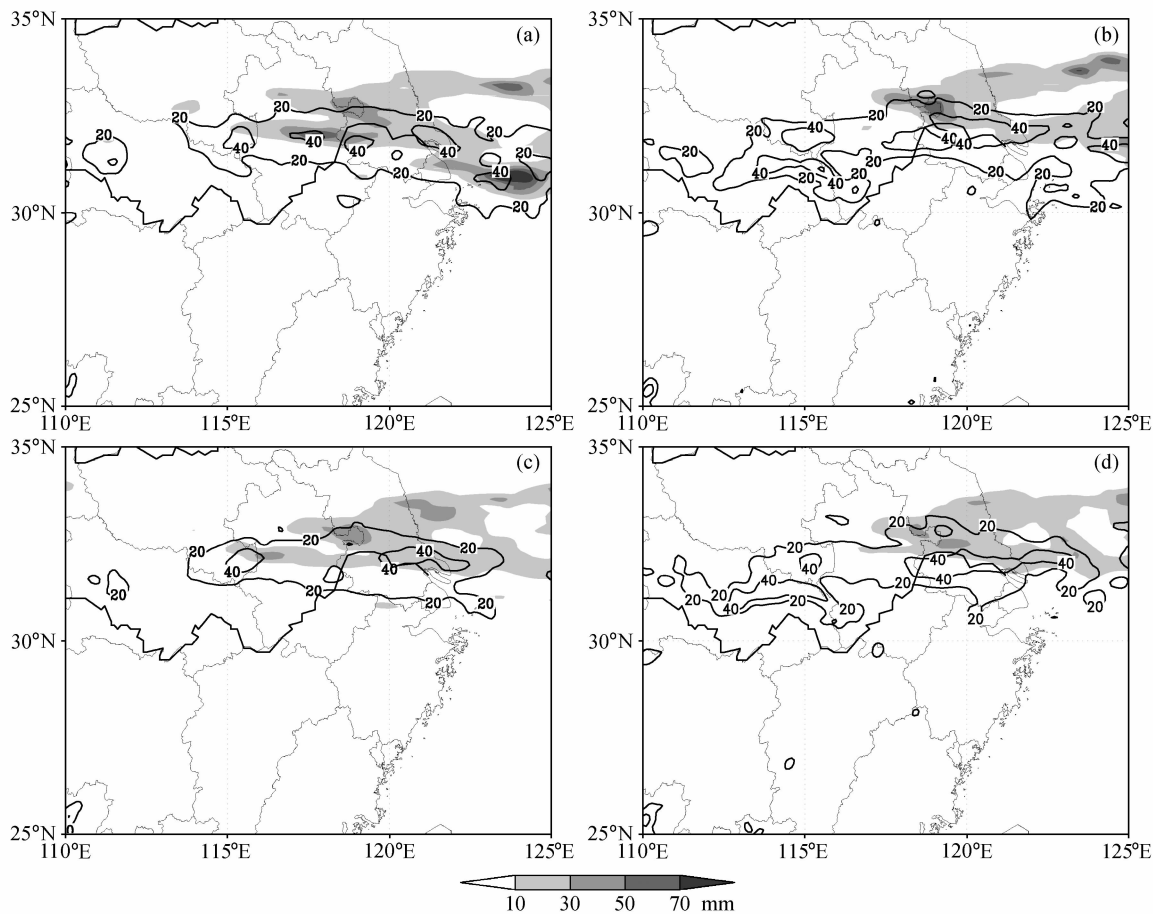


图 4 对流性降水（阴影）和网格尺度降水（等值线）的比较（单位：mm）：(a) SLAB 方案；(b) RUC 方案；(c) NOAH 方案；(d) UCM 方案

Fig. 4 Comparison between convective rain (shade) and grid-scale rain (contour, units: mm): (a) SLAB scheme; (b) RUC scheme; (c) NOAH scheme; (d) UCM scheme

槽在未来 12 小时受极地冷空气的影响加强南压，使江淮地区上空西北气流加强，带来干冷空气；同时副高脊点西伸，面积扩大，使西南气流带来的暖湿空气在江淮地区上空堆积，为本次暴雨提供了有利的环流形势。冷暖空气的交绥是通过位于江淮地区的一条东北-西南走向的中低层切变线来实现的，这是本次暴雨过程的重要影响系统。

通过试验结果分析，从 7 日 00 时开始，850 hPa 位于安徽、江苏中北部地区有强西南气流与弱西北气流辐合，形成一条中尺度切变线，切变线上有气旋性扰动，并逐渐发展有中尺度气旋，该低空切变线始终在 32°N 附近摆动。耦合不同的陆面参数化方案均能模拟出这一影响系统，并且得到的高低空水平环流形势较一致，与实况较吻合（图略）。

7 日 12 时左右开始了新一轮强降水，主要降水

集中在江阴 [中心经纬度：(31°54′N, 120°15′E)] 和无锡 [中心经纬度：(31°34′N, 120°17′E)] 地区。图 5 给出 7 日 12 时沿 120°E 的垂直剖面图，比较各方案模拟暴雨发生时动力和水汽条件的情况。除了 RUC 方案，在 30°N~32°N 的暴雨落区内，其他各方案均模拟出上升运动和水汽通量散度的底层辐合区，尤以 NOAH 和 UCM 方案的模拟效果较合理，强烈的上升运动和充分的水汽条件对该区的暴雨发生至关重要。RUC 方案中的上升运动显著区在 27°N 附近，而在对应的暴雨落区内，却是弱的下沉运动，与实际观测的暴雨落区位置不符。

4.5 城市下垫面降水变化的模拟比较

在几种陆面方案中，只有 UCM 方案是针对城市下垫面而设计的，但是 UCM 方案在 WRF 模式中不能单独调用，而是与 NOAH 方案耦合使用。

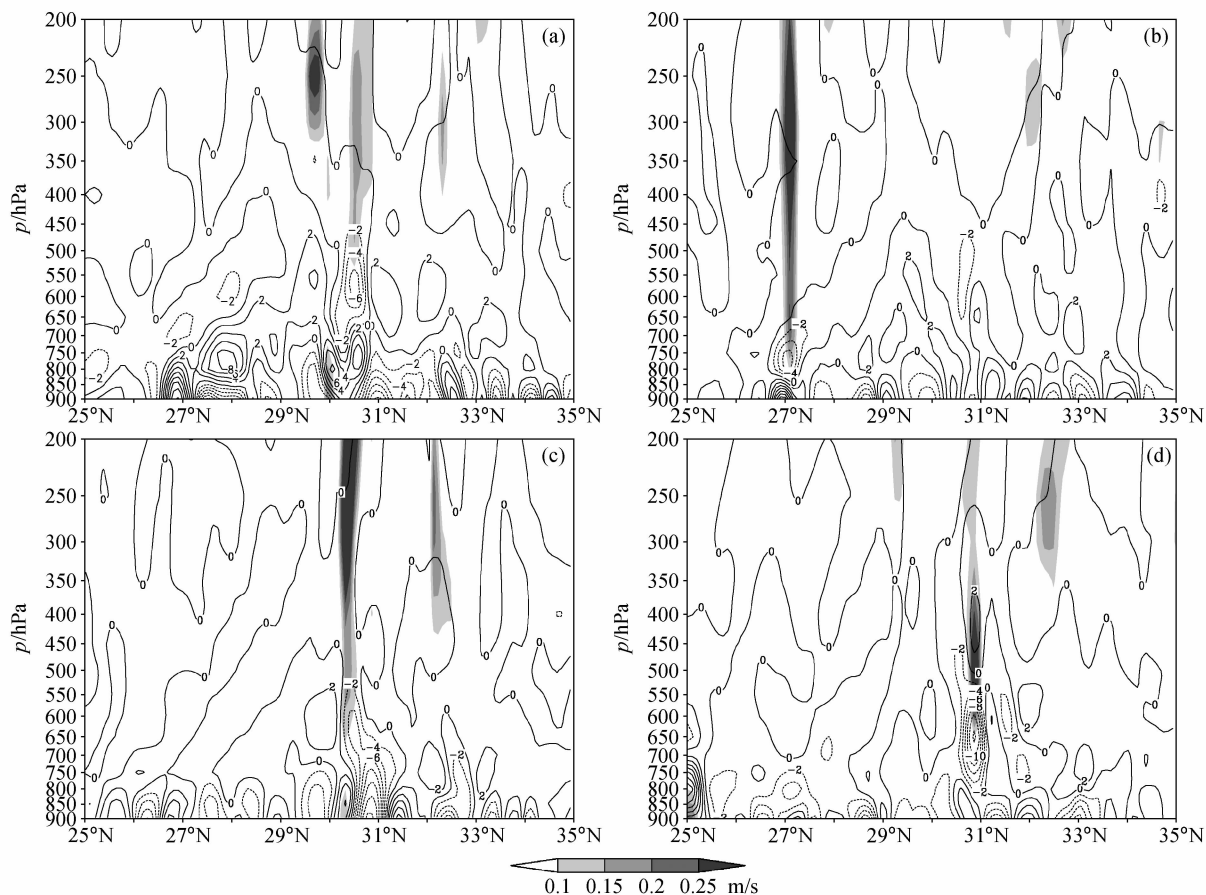


图5 模拟2007年7月7日12时沿120°E垂直速度(阴影为垂直速度 >0.1 m/s的上升区)和水汽通量散度(等值线,单位: 10^{-7} s^{-1}): (a) SLAB方案; (b) RUC方案; (c) NOAH方案; (d) UCM方案

Fig. 5 Simulated vertical velocity (the shaded areas represent vertical velocity greater than 0.1 m/s) and divergence of moisture fluxes (iso-lines, units: 10^{-7} s^{-1}) along 120°E at 1200 UTC 7 Jul 2007: (a) SLAB scheme; (b) RUC scheme; (c) NOAH scheme; (d) UCM scheme

当选用 UCM 方案时,先判断下垫面用地类型后再确定是否调用,如果下垫面用地类型为城市型,则在调用 NOAH 方案后会自动启用 UCM 方案,根据 UCM 方案的设计调整原 NOAH 方案中的陆面物理过程;当下垫面用地类型不为城市型,则只启用 NOAH 方案。目前,国内使用该陆面方案进行的工作并不多,因此对 UCM 方案的特点和适用性有待进一步试验。

南京市是本次暴雨过程的主要落区之一,相对于其他暴雨落区而言是一个较大的城市(城市总面积 6516 km^2 ,其中市区约 976 km^2),因此选取南京市作为试验对象,以考察各模式对城市下垫面区域的模拟能力。试验利用南京观测站(32.0°N , 118.48°E)逐时降水资料和 TRMM 卫星观测资料 3B42RT 作为实况参考资料。图 6 给出不同方案模拟的 7 日 00 时~8 日 00 时南京($31.8^\circ \text{N} \sim 32.2^\circ \text{N}$,

$118.4^\circ \text{E} \sim 118.8^\circ \text{E}$)区域平均每 3 小时降水量演变与实况参考资料变化情况。

单站观测资料受局地性限制较大,结合 TRMM 资料[在($31.8^\circ \text{N} \sim 32.2^\circ \text{N}$, $118.4^\circ \text{E} \sim 118.8^\circ \text{E}$)作区域平均]共同参考可见(图 6a),在南京地区 7 日 09~12 时,受强降水影响,南京地区的降水量迅速增加,7 日 18 时~8 日 00 时,又有新一轮降水,但强度减弱。从 4 种方案的模拟结果(如图 6b)来看,各方案之间显示的降水量变化趋势比较接近,但均与实况演变有一定差异,降水量也较实况偏小,这一方面与本次试验模拟降水量总体偏低有关,另外,可能与南京区域网格点降水平均后降低了局地强降水的峰值有关。相比较而言,只有 UCM 方案较能反映出上述这两个时段内的降水变化,并且 UCM 方案对 24 小时总降水的东部降水中心模拟较好,这可能与下垫面是城市区域有关,

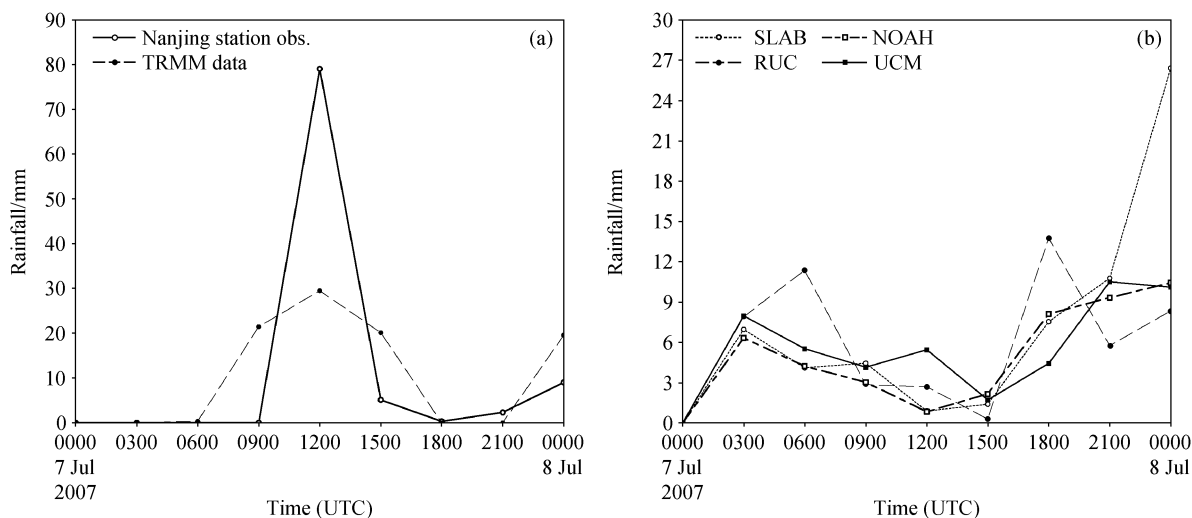


图 6 南京地区 7 日 00 时~8 日 00 时平均每 3 h 降水量随时间分布 (单位: mm): (a) 实况; (b) 模式

Fig. 6 Three-hour rainfall (mm) in Nanjing area from 0000 UTC 7 Jul to 0000 UTC 8 Jul 2007: (a) Observation; (b) simulations

因而在耦合 UCM 方案后提高了模拟性能, 关于这方面的验证还值得继续研究。本次试验所采用的水平网格距为 20 km, 这对于研究城市下垫面对降水的影响并不理想, 显然分辨率过低, 会影响到 UCM 方案的模拟效果, 这将在以后的试验中改进。总之, UCM 方案对本次暴雨过程的模拟还是较为合理的。

5 结论

尽管大气本身的动力过程对系统性天气事件的产生至关重要, 但是从试验结果发现, 陆面物理过程的影响也是重要的。通过耦合 WRF 模式中不同陆面方案模拟降水过程进行对比试验, 结果发现:

(1) 降水对陆面物理过程是敏感的。耦合陆面方案可以显著改善降水模拟结果, 使之与实况更接近。

(2) 4 种陆面方案 (SLAB、RUC、NOAH、UCM) 模拟的降水量均较实况偏小, 这可能因为试验所采用的分辨率对局地较小尺度系统的模拟能力有限。然而, 由于不同方案考虑的要素和物理过程存在一定差异, 它们对降水的中心落点、雨量值、降水类型等的模拟各有所长。

(3) TRMM 资料与 4 种方案模拟结果均反映出本次降水日变化过程中夜间的峰值特征, 但是从位相上看试验均比卫星资料滞后约 3~6 小时, 可能与模式中形成降水的云物理过程需要一定的响应时间有关系。从不同降水事件的特征来看, 夜间降

水峰值的出现是短时降水和持续性降水的综合反映, 而凌晨后的降水则主要由持续性降水造成。

(4) 4 种方案模拟的高低空水平环流特征均有较好的一致性, 但对动力和水汽条件的模拟还存在一定差异, 这将会对降水的准确预报产生影响。

(5) 综合比较各种试验结果, NOAH 方案在本次暴雨过程的模拟中较其他方案更稳定与合理。针对城市下垫面的情况, UCM 方案在模拟过程中表现出来的效果略优于其他方案。然而, 建立在 NOAH 方案基础上的 UCM 方案在总体模拟效果上并未表现出比 NOAH 方案更多的优越性, 这可能因为本次试验所采用的分辨率相对研究城市区域而言是较低的, 以致影响到 UCM 方案的模拟效果。

值得探讨的是, 降水的日变化问题是当前的一个研究热点, 其中涉及的科学问题很复杂, 用数值模拟方法探讨这方面的工作还较少, 特别是机理上的讨论, 因此值得深入研究。另外, WRF 模式所采用的下垫面用地类型设置以及 UCM 方案中用到的各种固定参数值是否适用于中国区域还有待进一步试验。本文所讨论的降水对 WRF 模式中陆面方案的敏感性仅仅是一个个例, 结论是初步的, 还需要更多个例的验证, 这将在今后的工作中继续试验与讨论。

参考文献 (References)

Baker R D, Lynn B, Boone A, et al. 2001. The influence of soil moisture, coastline curvature, and land-breeze circulations on sea-

- breeze-initiated precipitation [J]. *J. Hydrometeorol.*, 2: 193 – 211.
- 包庆, 刘屹岷, 周天军, 等. 2006. LASG/IAP 大气环流谱模式对陆面过程的敏感性试验 [J]. *大气科学*, 30 (6): 1078 – 1089. Bao Qing, Liu Yimin, Zhou Tianjun, et al. 2006. The sensitivity of the spectral atmospheric general circulation model of LASG/IAP to the land process [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (6): 1078 – 1089.
- 布和朝鲁, 纪立人, 崔茂常. 2002. 夏季我国干旱、半干旱区陆面过程能量平衡及其局地大气环流 [J]. *气候与环境研究*, 7 (1): 61 – 73. Buhe Chaolu, Ji Liren, Cui Maichang. 2002. Energy balance of land surface process in the arid and semi-arid regions of China and its relation to the regional atmospheric circulation in summer [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 7 (1): 61 – 73.
- Changnon S A. 1979. Rainfall changes in summer caused by St. Louis [J]. *Science*, 205: 402 – 404.
- Chen F, Zavisla Janjic, Kenneth Mitchell. 1997. Impact of atmospheric surface-layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale ETA model [J]. *Bound.-Layer Meteorol.*, 85: 391 – 421.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129: 569 – 585.
- 陈炯, 王建捷. 2006. 边界层参数化方案对降水预报的影响 [J]. *应用气象学报*, 17 (1): 11 – 17. Chen Jiong, Wang Jianjie. 2006. Mesoscale precipitation simulation sensitivity to PBL parameterization [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 17 (1): 11 – 17.
- Craig K, Bornstein R. 2002. MM5 simulation of urban induced convective precipitation over Atlanta [C]// Preprints, Fourth Conf. on the Urban Environment, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc., 5 – 6.
- Davison N E, Kurihara K, Kato T, et al. 1998. Dynamics and prediction of a mesoscale extreme rain event in the Baiu front over Kyushu, Japan [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 126: 1608 – 1629.
- Dudhia J. 1996. A multi-layer soil temperature model for MM5 [C]// The 6th PSU/NCAR Mesoscale Model Users Workshop, Boulder, CO, PSU/NCAR, 49 – 50.
- Jankov I, Gallus W A Jr, Shaw B, et al. 2004. An investigation of IHOP convective system predictability using a matrix of 19 WRF members [C]// 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U. S. A. Jan. 10 – 15.
- Joseph B K. 2004. Weather research and forecasting model: A technical overview [C]// 84th AMS Annual Meeting, Seattle, U. S. A. Jan. 10 – 15.
- Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. 2001. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models [J]. *Bound.-Layer Meteorol.*, 101: 329 – 358.
- Kusaka H, Kimura F. 2004. Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82: 67 – 80.
- Kusaka H, Crook A, Kniviel J C, et al. 2005. Sensitivity of the WRF model to advection and diffusion schemes for simulation of simulation of heavy rainfall along the Baiu front [J]. *Scientific Online letters on the Atmosphere*, 1: 177 – 180.
- Laval K, Picon L. 1986. Effect of a change of the surface albedo of the Sahel on climate [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43: 2418 – 2429.
- Li Y, Ji J. 2001. Model estimates of global carbon flux between vegetation and the atmosphere [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18: 807 – 818.
- Manabe S. 1969. Climate and the ocean circulation: I The atmospheric circulation and the earth's surface [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 97 (10): 739 – 774.
- 刘永强, 叶笃正, 季劲钧. 1992a. 土壤湿度和植被对气候的影响——I: 短期气候异常持续性的理论分析 [J]. *中国科学 (B 辑)*, (4): 441 – 448. Liu Yongqiang, Ye Duzheng, Ji Jinjun. 1992a. On the impact of climate of soil moisture and vegetation—Part I: theoretical analysis of the short-term sustainability of the abnormal climate [J]. *Sci. China (Ser. B)* (in Chinese), (4): 441 – 448.
- 刘永强, 叶笃正, 季劲钧. 1992b. 土壤湿度和植被对气候的影响——II: 短期气候异常持续性的数值试验 [J]. *中国科学 B 辑*, (4): 554 – 560. Liu Yongqiang, Ye Duzheng, Ji Jinjun. 1992b. On the impact of climate of soil moisture and vegetation—Part II: numerical experiments of the short-term sustainability of the abnormal climate [J]. *Sci. China (Ser. B)* (in Chinese), (4): 554 – 560.
- 林朝晖, 刘辉志, 谢正辉, 等. 2008. 陆面水文过程研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 935 – 949. Lin Zhaohui, Liu Huizhi, Xie Zhenghui, et al. 2008. Recent progress in the land-surface and hydrological process studies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (4): 935 – 949.
- Molinari J, Dudek M. 1992. Parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: A critical review [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 120: 326 – 344.
- Nesbitt S W, Zipser E J. 2003. The diurnal cycle of rainfall and convective intensity according to three years of TRMM measurements. *J. Climate*, 16 (10): 1456 – 1475.
- Smirnova T G, Brown J M, Benjamin S G. 1997. Performance of different soil model configurations in simulating ground surface temperature and surface fluxes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125: 1870 – 1884.
- Smirnova T G, Brown J M, Benjamin S G, et al. 2000. Parameterization of coldseason processes in the MAPS land-surface scheme [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (D3): 4077 – 4086.
- Sorooshian S, Gao X, Hsu K, et al. 2002. Diurnal variability of

- tropical rainfall retrieved from combined GOES and TRMM satellite information [J]. *J. Climate*, 15 (9): 983–1001.
- 孙晶, 楼小凤, 胡志晋, 等. 2007. 梅雨期暴雨个例模拟及其中小尺度结构特征分析研究 [J]. *大气科学*, 31 (1): 1–18. Sun Jing, Lou Xiaofeng, Hu Zhijin, et al. 2007. A numerical simulation on torrential rain during the Meiyu period and analysis of mesoscale and microscale structure of convective systems [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (1): 1–18.
- Vemekar A D, Zhou J, Shukla J. 1995. The effect of Eurasian snow cover on the Indian monsoon [J]. *J. Climate*, 8: 248–266.
- 王欢, 倪允琪. 2006. 2003 年淮河汛期一次中尺度强暴雨过程的诊断分析和数值模拟研究 [J]. *气象学报*, 64 (6): 734–742. Wang Huan, Ni Yunqi. 2006. Diagnostic analysis and numerical simulation of a mesoscale torrential system in the Huaihe valley during the rainy season in 2003 [J]. *Acta meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64 (6): 734–742.
- 王建捷, 胡欣, 郭肖容. 2001. MM5 模式中不同对流参数化方案的比较试验 [J]. *应用气象学报*, 12 (1): 41–53. Wang Jianjie, Hu Xin, Guo Xiaorong. 2001. Comparison experiments on cumulus parameterization schemes of the MM5 [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 12 (1): 41–53.
- 王婷, 吴池胜, 冯瑞权. 2008. 2005 年 6 月广东一次暴雨过程的中尺度对流系统的数值研究 [J]. *大气科学*, 32 (1): 184–196. Wang Ting, Wu Chisheng, Fong Soi Kun. 2008. A numerical study of a mesoscale convective system associated with the heavy rain event over Guangdong Province in June 2005 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (1): 184–196.
- 薛永康, 曾凡荣, Schlosser A C, 等. 1998. 一个植被模式的检验和它在陆气相互作用中的应用 [J]. *大气科学*, 22 (4): 575–586. Xue Yongkang, Zeng Fanrong, Schlosser A C, et al. 1998. A simplified simple biosphere model and its application to land-atmosphere interactions [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 22 (4): 575–586.
- Yu R, Zhou T, Xiong A, et al. 2007a. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L01704, doi: 10.1029/2006GL028129.
- Yu R, Xu Y, Zhou T, et al. 2007b. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L13703, doi: 10.1029/2007GL030315.
- 张曼, 王昂生, 季仲贞, 等. 2006. 不同降水方案对“03. 7”一次暴雨过程模拟的影响 [J]. *大气科学*, 30 (3): 441–452. Zhang Man, Wang Angsheng, Ji Zhongzhen, et al. 2006. Influence of different precipitation parameterization schemes on a simulated “03. 7” heavy rainfall case [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (3): 441–452.
- 赵鸣, 周炜丹, 陈潜, 等. 2006. 中尺度模式中辐射作用的敏感性试验 [J]. *气象科学*, 26 (1): 1–9. Zhao Ming, Zhou Weidan, Chen Qian, et al. 2006. A sensitivity experiment of mesoscale model to radiation [J]. *Sientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 26 (1): 1–9.
- 周天军, 钱永甫. 1996a. 地形效应影响数值预报结果的试验研究 [J]. *大气科学*, 20 (4): 452–462. Zhou Tianjun, Qian Yongfu. 1996a. An experimental study on the effects of topography on numerical prediction [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 20 (4): 452–462.
- 周天军, 钱永甫. 1996b. 模式水平分辨率影响积云对流参数化效果的数值试验 [J]. *高原气象*, 15 (2): 204–211. Zhou Tianjun, Qian Yongfu. 1996b. Numerical experiments of effect of model horizontal resolution on cumulus parameterization [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 15 (2): 204–211.