

郑祚芳,高华,李青春. 2013. 城市化对北京一次极端降水过程影响的数值分析. 气象, 39(3):340-346.

城市化对北京一次极端降水过程影响的数值分析^{*}

郑祚芳 高 华 李青春
中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

提 要: 通过敏感性试验探讨了城市化对北京 2011 年 6 月 23 日局地极端降水事件的影响。结果表明耦合了城市冠层模式的 WRF 系统能较好地模拟出强降水的局地性和突发性特征, 考虑了精细下垫面分类的敏感性试验模拟降水更接近实况; 下垫面城市化对地表能量平衡影响明显, 对大气的热量影响除加强地表对边界层大气向上感热输送外, 还会减少局地地表蒸发及大气水分供应, 增加边界层高度, 并对移经本地的天气系统强度及水汽输送产生较明显的影响。

关键词: 极端降水, 城市化, 数值模拟, 北京

中图分类号: P458, X16 **文献标识码:** A **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2013. 03. 008

Numerical Simulation for the Urbanization Effects on an Extreme Rainfall in Beijing

ZHENG Zuofang GAO Hua LI Qingchun
Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

Abstract: Based on replacing the original USGS land-use data with a new urban land-use dataset, the 1 km-gridpoint-interval WRF model and its coupling Urban Canopy Model (UCM) were used to simulate an extreme rainfall event that occurred in Beijing City on 23 June 2011. The result of the sensitivity experiment more agrees with the reality than the control experiment. Difference in surface energy balance between urban and rural areas shows that in daytime urban area absorbs more solar radiation for the area exhibits lower values of albedo. Due to the lack of vegetation in the urban, which inhibits cooling by evapotranspiration, most part of the incoming energy is partitioned into sensible heat flux to heat the urban region. The urban expansion reduces natural vegetation cover, and then it can help to decrease ground evaporation and local water vapor supply, enlarge surface sensible heat flux, deepen PBL height and enhance the mixing of water vapor. Hence it is not conducive to the occurrence of the rainfall.

Key words: extreme precipitation, urbanization, numerical simulation, Beijing

引 言

随着城市化的快速发展,发生于城市区域的极端降水事件对社会经济、人们生活的影响日趋严重。极端降水是小概率高影响天气事件,其发生发展不仅受大气中各种尺度天气系统的相互影响和制约,

与局地地形及下垫面状况也有较复杂的关系,准确预报这类系统还有相当的难度(Palumbo et al, 1980; 吴庆梅等, 2012; 郑祚芳等, 2009)。目前国内在对精细数值天气模式的科研与业务应用中,对下垫面分类这一影响陆面-大气相互作用的关键性数据,广泛采用的是由美国地质勘测局(USGS)提供的 30 s 等经纬间距陆面信息数据集,该数据集以 20

^{*} 国家自然科学基金(41105024)和城市气象研究基金(UMRF201108)共同资助
2012 年 2 月 28 日收稿; 2012 年 4 月 11 日收修定稿
第一作者: 郑祚芳, 主要从事区域精细天气预报相关研究. Email: zfzheng@ium. cn

2 数值试验方案

该数值试验采用 WRFV 3.1 版本。该版本中

Kusaka 等(2004)将一个单层的 UCM 模式耦合到了 WRF 模式中。在该 UCM 模式中,简单考虑了城市建筑及道路的几何特征,用于表示城市冠层对短波、长波辐射的遮挡、截取、反射作用以及风切变

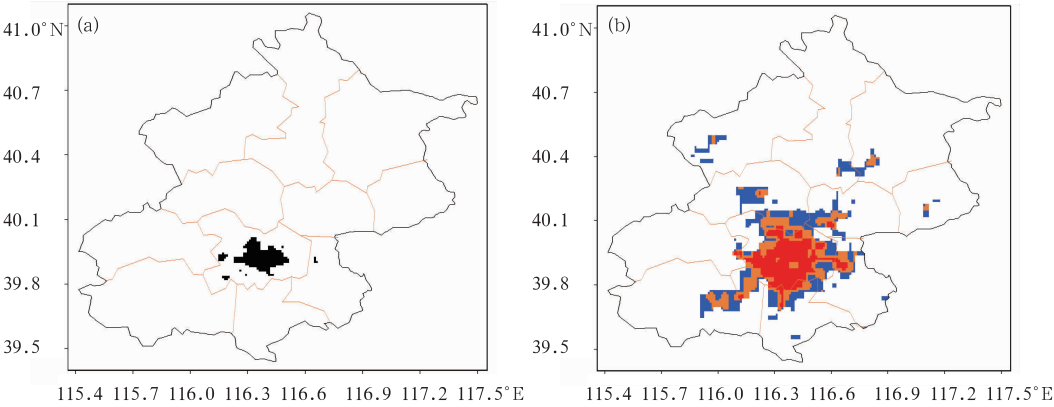


图 2 数值试验中环北京 1 km 分辨率城市下垫面(涂色区域)分布
(a) 控制试验,(b) 敏感性试验

Fig. 2 The simulated underlying surface (colored area) characteristics in Beijing area with 1 km resolution

(a) USGS data; (b) sensitivity test data based on new fine resolution

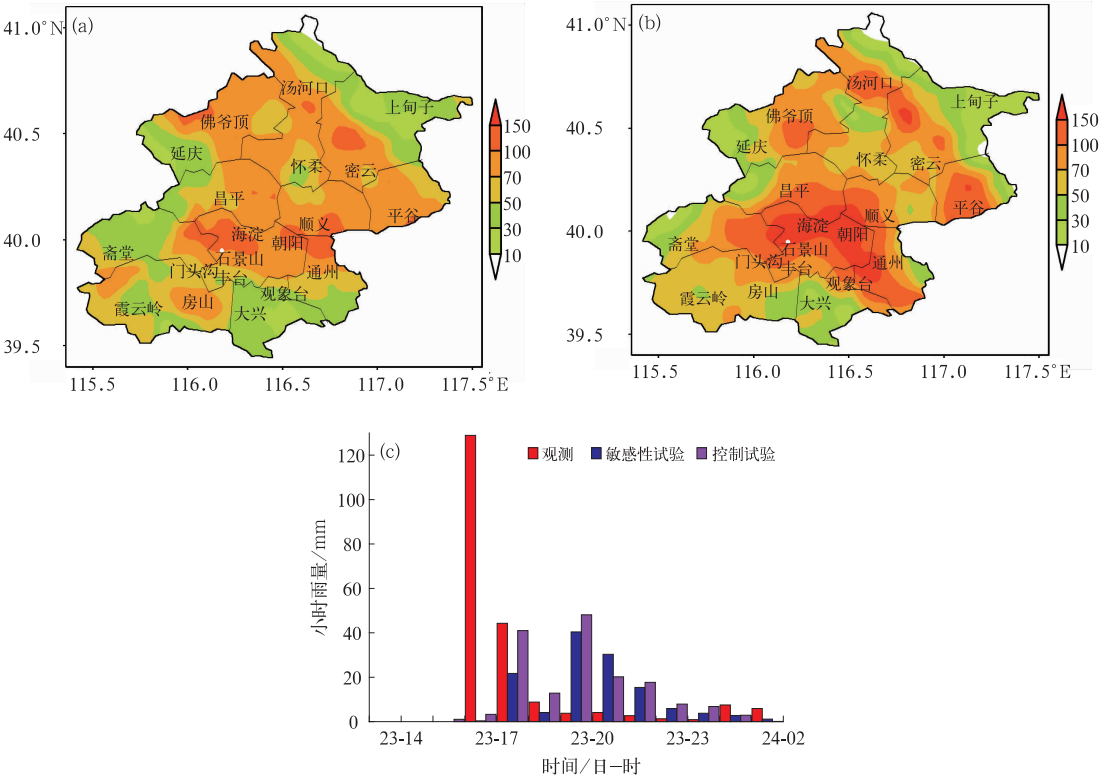


图 3 模拟的 2011 年 6 月 23 日 14 时至 24 日 02 时逐时降水(单位:mm)

(a)敏感性试验,(b)控制试验及(c)暴雨中心逐时雨量

Fig. 3 The simulated hourly precipitation from 14 BT 23 to 02 BT 24 June 2011 (unit; mm)
(a) sensitivity experiment, (b) control experiment and (c) hourly rainfall in rainstorm center

的影响等,对建筑物顶、墙体以及道路面的热量传输都分别进行了计算。模拟域配置为 $15\text{--}3\text{--}1\text{ km}$ 三重嵌套,水平格点数分别为 160×120 、 251×251 及 281×281 ,垂直方向 37 层。初始条件和边界条件由 6 h 间隔的 NCEP 再分析资料提供。采用的其他物理过程方案包括:WM-3 简单冰相微物理过程方案,Dudhia 短波辐射方案,RRTM 长波辐射方案以及 YSU 边界层方案。模式外层采用 Kain Fritsch 的积云对流方案,内两层不采用积云对流方案。试验从 2011 年 6 月 23 日 08 时开始积分 36 h,文中主要对最内层的模拟结果进行讨论。敏感性试验与控制试验的不同之处在于引入了由 Landsat TM 提取的京津冀区域 30 m 分辨率下垫面 GIS 数据集,代替美国 USGS 提供的 30 s 分辨率地表数据并插值到模拟区域内。图 2 是模拟范围最内层环北京区域城市下垫面分布,可见新的精细化资料较 USGS 提供的陆面分类数据有明显改进。原 USGS 数据所描述的城市区域明显偏小(基本仅为城市三环线范围),精细化资料更真实地反映了模拟区域内下垫面结构,较合理体现了自 20 世纪 90 年代以来北京城市用地迅速扩张、城市建成区面积显著增加的特征,城市区域扩大了约 7 倍,并区分了高密度、中密度及低密度城建区(图中红色、黄色、蓝色区域所示)。此外还修正了原 USGS 资料在环北京区域将亚洲中纬度区域落叶阔叶林(Decids Broadlf)下垫面类型归属为热带(或亚热带)稀疏大草原(Savanna)类型的问题(图略)。

3 模拟结果分析

3.1 模拟降水分布差异

图 3 给出的是各方案模拟的北京地区 2011 年 6 月 23 日 14 时至 24 日 05 时累计降水及暴雨中心(39.93°N 、 116.16°E)逐时雨量分布。对比观测降水实况(图 1)可见,两方案模拟的雨区范围类似观测实况,但模拟的区域雨量均较实际观测值偏大,特别是控制试验,较实况偏大了很多。模拟的强降水中心位置亦较观测有所偏移,这一方面与本文用的模拟精度有关(水平分辨率为 1 km),另外也表明针对强降水过程的定点、定时和定量数值模拟水平仍然有待进一步的改进。但总体上来看,控制试验和敏感性试验模拟的偏差均在可接受的范围内,表现

在二者都较好地模拟出了本次降水的局地性(图 3a 和图 3b 所示,强降水范围小,主要集中于城区西部及北部)、突发性(图 3c 所示,表现在模拟的降水主要发生于 23 日 18—22 时)及高强度(每小时雨量达 $20\sim 40\text{ mm}$)等特征,对强降水出现时间、暴雨中心位置及降水强度亦有较好的把握,表明耦合了城市冠层模式后 WRF 系统对本次极端强降水过程具备较好的模拟能力。但不同方案模拟的降水差异仍然是明显的,主要表现在考虑了精细下垫面分类的敏感性试验模拟的区域平均雨量比控制试验弱,雨区分布相对更接近实况(图 3a 所示),表明采用精细化的地表类型分布能够更加合理模拟此次降水过程。此外,敏感性试验模拟的降水开始时间要比控制试验晚约 2 h,模拟暴雨中心雨量也比控制试验弱(图 3c)。这表明引入更真实的下垫面结构后,由于更大范围的城市下垫面拥有相对更高的粗糙度,可能会对系统强度及移动速度产生影响。

3.2 不同下垫面地表能量平衡差异

城市化主要改变的是局地下垫面属性,下垫面的改变会导致多方面的差异,这些差异必然会在地表能量平衡过程中体现出来。由于实际暴雨中心(39.93°N 、 116.16°E)在控制试验中为第三类(灌溉农田/草地)下垫面,而在敏感性试验中已发展为第一类城市建筑物下垫面(图 2),因而分析该地在不同模拟试验中要素的差异可基本反映城市发展的影响。图 4 给出的是模拟的该地 6 月 23 日 14 时至 24 日 14 时地表能量平衡各分量逐时变化,其中正值表示能量收入,负值表示能量支出。试验中城区比郊区在日间具有更高的短波辐射吸收,这是由于城市下垫面相比郊区下垫面具有更低的反射率(前者为 10%,后者达 18%)所致。

从图 4 可见,敏感性试验与控制试验相比,差异最大的是日间的潜热通量,最大时在午间,夜间的差异却很小。意味着城区日间的潜热通量比郊区的小很多,这与城区植被少及缺少水汽蒸发蒸腾作用有关。感热通量和土壤热通量城区与郊区相比也存在较大差异,表现为城区大于郊区,也主要发生在白天。由于城市下垫面具有的低反射率特征,其吸收的短波辐射会更多。此外城区缺少水汽的蒸发蒸腾,潜热通量小,增加的短波辐射吸收除部分用于增大向下的土壤热通量外,其余部分则主要以感热的形式加热大气。反映出地表下垫面对大气的热量与

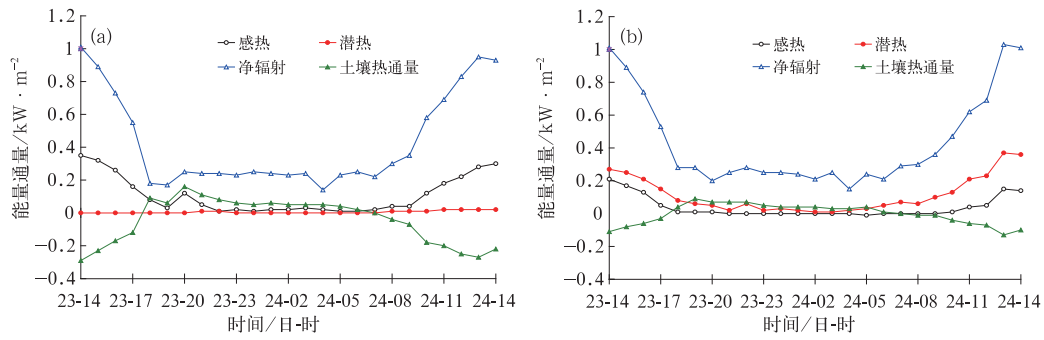


图 4 模拟的 2011 年 6 月 23 日 14 时至 24 日 14 时暴雨中心(39.93°N、116.16°E)地表能量平衡的逐时变化
(a) 敏感性试验,(b) 控制试验

Fig. 4 The hourly change of surface energy balance in the simulated rainstorm center from 14 BT 23 to 14 BT 24 June 2011
(a) sensitivity experiment, (b) control experiment

水汽输送作用主要取决于地表热力辐射状况,即取决于太阳辐射入射强度日变化的事实。

环北京精细下垫面信息引入造成地表向上感热和潜热通量的模拟差异,主要发生在太阳活动最强的中午前后。敏感性试验中地表向上感热通量明显大于控制试验,地表对近地层大气热量的输送过程的变化表明随着城市下垫面的日愈扩大,会显著增强白天地表对大气的向上感热输送。城市下垫面与自然植被不同,其会阻隔地下土壤与边界层大气间自然的热力、水分和能量的交换。随太阳辐射强度增强,城市地表温度相对上升快,易于在地表与近地层大气间形成较大的温差,从而会通过地表辐射平衡调整作用,在降水前的白天显著加强对边界层大气的向上感热输送。而其对地表向上潜热通量的影响则明显不同,同一时刻城区潜热通量明显小于郊区,表明以城市为主的下垫面扩大会减弱白天地表对大气的向上潜热输送。这说明下垫面城市化对大气的热量影响除加强地表对边界层大气的向上感热输送外,还会减少局地地表蒸发及相应的局地大气水分供应。

3.3 对近地面层气象要素及大气边界层高度影响

下垫面改变除了会直接导致地表能量平衡的差异外,还会对局地边界层内气象要素产生影响(周荣卫等,2008)。图 5 给出的是模拟的暴雨中心(控制试验中为郊区下垫面类型,敏感性试验中发展为城市地表)6 月 23 日 14 时至 24 日 14 时近地面层气

象要素及大气边界层高度的逐时变化。可见,在敏感性试验中模拟地表温度明显高于控制试验,而 2 m 相对湿度及 10 m 风速则要低于控制试验的模拟值。分析试验区域范围其他站点的模拟结果,亦可见类似的分布特征。表明城市化的结果,会导致城区粗糙度增加,进而使得近地面层温度升高、湿度降低、风速减小,形成城市区域的热岛和干岛效应。肖丹等(2011)应用成都地区精细下垫面土地利用资料,并在 WRF 中耦合了单层城市冠层模式,对晴空背景下的成都城市气象特征进行了模拟,亦有类似的发现。此外,下垫面城市化同样会对大气边界层高度产生影响,敏感性试验中城市区域边界层高度明显高于郊区,降水发生前更为明显,表明在此次降水过程前期,下垫面地表与低层大气间存在较强的物质能量交换,边界层大气物理过程活跃。

3.4 对大气垂直结构的影响

前文分析表明,城市化发展导致下垫面的改变,会减少局地大气水分供应,并对大气边界层内气象要素及边界层高度产生影响。为进一步分析城市化发展导致的这些差异是否会上传到对流层,进而对移经本地的天气系统强度及移动速度的影响。在模拟暴雨强盛期(6 月 23 日 18 时)沿暴雨中心(39.93°N)制作了垂直速度及水汽混合比的纬度剖面(图 6)。在控制试验中(图 6a),暴雨中心所在地为灌溉农田/草地下垫面,试验模拟的中小尺度对流系统中心最大垂直速度达 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,相应的水汽输送可达到 500 hPa 高度。而在敏感性试验中

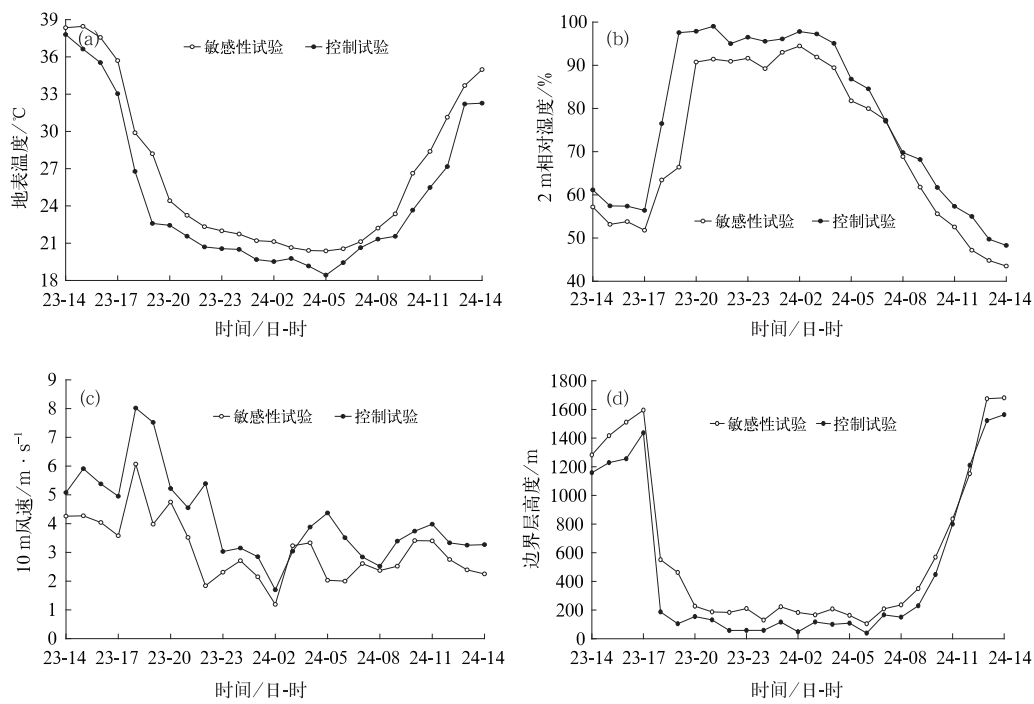


图 5 模拟的 2011 年 6 月 23 日 14 时至 24 日 14 时暴雨中心(39.93°N,116.16°E)逐时气象要素变化
(a) 地表温度,(b) 2 m 相对湿度,(c) 10 m 风速,(d) 边界层高度

Fig. 5 The hourly change of meteorological elements in the simulated rainstorm center
from 14 BT 23 to 14 BT 24 June 2011

(a) surface temperature, (b) relative humidity at 2 m, (c) wind speed at 10 m, (d) PBL height

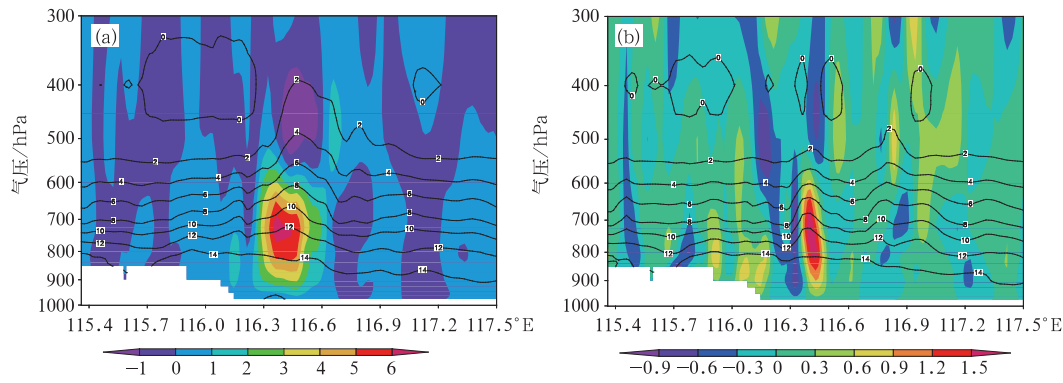


图 6 模拟的 6 月 23 日 18 时垂直速度(涂色,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)及水汽混合
比(等值线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)沿 39.93°N 剖面
(a) 控制试验,(b) 敏感性试验

Fig. 6 The simulated cross section of vertical speed (shaded areas, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and
water-vapour content (solid line, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) along 39.93°N
(a) control experiment, (b) sensitivity experiment

(图 6b),由于引入了更精细的土地利用资料,当地下垫面已发展为城市建筑物地表。与控制试验相比,敏感性试验模拟的对流系统水平尺度更小,系统中心最大垂直速度仅为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,明显偏弱,其位置也更偏北,分析其他物理量如涡度、散度

等均具有类似的结果(图略)。此外,敏感性试验模拟的局地水汽垂直输送力度也弱于控制试验。表明城市化发展的影响,会对移经本地的天气系统强度及水汽输送产生明显的影响。它不仅会削弱移经本地的天气系统的强度及移动速度,对局地水汽输送

也是不利的,这与城市下垫面具有更大的粗糙度、更少的自然植被所导致局地能量循环差异有关。

4 结论和讨论

应用耦合城市冠层模式的高分辨率数值模拟系统及京津冀地区 30 m 分辨率下垫面数据,通过敏感性试验初步分析了城市化对北京局地极端降水事件的影响。结果表明:

(1)针对 2011 年 6 月 23 日北京局地极端强降水的数值试验表明,耦合了城市冠层模式的 WRF 系统能较好模拟出强降水的局地性及突发性特征。考虑了精细下垫面分类的敏感性试验模拟的降水更接近实况,能够更合理地模拟此次降水过程。

(2)城市下垫面相对郊区下垫面具有更高的粗糙度、更少的自然植被及更低的反射率,这种差异会在地表能量平衡过程中反映出来。下垫面城市化对大气的热量影响除加强地表对边界层大气向上感热输送外,还会阻碍局地地表蒸发及相应的大气水分供应,增加边界层高度,并对移经本地的天气系统强度及水汽输送会产生较明显的影响。

参考文献

- 雷蕾,孙继松,魏东. 2011. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别. 气象, 37(2):10-15.
- 蒙伟光,张艳霞,李江南,等. 2010. WRF/UCM 在广州高温天气及城市热岛模拟研究中的应用. 热带气象学报, 26(3):273-282.
- 孙继松,舒文军. 2007. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究.

- 大气科学, 31(2):311-320.
- 孙继松,杨波. 2008. 地形与城市环流共同作用下的中尺度暴雨. 大气科学, 32(6):1352-1364.
- 王令,王国荣,孙秀忠,等. 2012. 应用多种探测资料对比分析两次突发性局地强降水. 气象, 38(3):281-290.
- 魏东,孙继松,雷蕾,等. 2011. 三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析. 气象, 37(4):30-40.
- 吴庆梅,杨波,王国荣,等. 2012. 北京地形和热岛效应对一次 β 中尺度暴雨的作用. 气象, 38(2):174-181.
- 肖丹,陈静,陈章,等. 2011. 成都精细下垫面信息对城市气象影响的模拟试验. 气象, 37(3):298-308.
- 张朝林,苗世光,李青春,等. 2007. 北京精细下垫面信息引入对暴雨模拟的影响. 地球物理学报, 50(5):1373-1382.
- 张琰,肖安,马力,等. 2011. WRF 耦合 4 个陆面过程对“6.19”暴雨过程的模拟研. 气象, 37(9):1060-1069.
- 郑祚芳,张秀丽. 2009. 北京地区一次局地强降水过程的数值分析. 热带气象学报, 25(1):442-448.
- 周荣卫,蒋维楣,何晓风. 2008. 城市冠层结构热力效应对城市热岛形成及强度影响的模拟研究. 地球物理学报, 51(3):715-726.
- Kusaka H, Chen F, Bao J W, et al. 2004. Simulation of the urban heat island effects over the Greater Houston Area with the high resolution WRF/LSM/Urban coupled system. Symposium on “Planning, Nowcasting, and Forecasting in the Urban Zone”. 1—15 January, Seattle, WA.
- Masson V. 2000. A physical-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. Bound Layer Meteor, 94(3):357-397.
- Palumbo A, Mazzarella A. 1980. Rainfall statistical properties in naples. Mon Wea Rev, 108(11):1011-1015.
- Rozoff C, Cotton W R, Adegoke J O. 2003. Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms. J Appl Meteor, 42(6):716-738.