

北京地区景观城市化进程对暴雨过程的影响 ——以“7·21”暴雨为例

张杰^{1,3}, 史培军^{1,2,3}, 杨静^{1,2,3}, 龚道溢^{1,2,3}

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 应急管理部—教育部
减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

摘要: 利用美国环境预测中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)等美国科研机构开发的气象模式WRF 3.8版本, 采用北京地区不同时期的土地利用数据, 选取影响北京的一次典型暴雨过程, 应用包含多层城市穹顶模式的模式参数化方案对其进行模拟研究。从小时降水模拟结果来看, 景观城市化区域(城市下垫面)的扩张使得暴雨持续更久, 使用2010年土地利用数据模拟的2012年7月21日暴雨过程小时降水量大于16 mm的时长较使用1990年土地利用数据模拟的结果增加了1 h; 从累积降水结果来看, 使用2010年土地利用数据模拟的24 h累积降水大于150 mm的区域较使用1990年土地利用数据模拟的结果增加了1534 km²。本文中模拟的逐小时降水与实际情况存在一定的差距, 未来的工作会深入研究模式的参数化方案和降水产生的机理进而深入地研究景观城市化进程对暴雨过程的影响。进一步研究需针对城市人为活动产生的大气气溶胶粒子、景观城市化密度变化等因子, 探究景观城市化对暴雨的可能影响。

关键词: 区域性暴雨; WRF; 数值模拟; 景观城市化; 北京

DOI: 10.11821/dlxb202001009

1 引言

近年来, 极端天气事件受到越来越多的关注^[1], 极端降水事件作为极端天气事件中的一种, 对自然环境和人们的正常生活造成严重影响, 特别是持续时间长的极端降水更容易造成大范围的严重洪涝灾害。中国地处东亚季风区, 水汽充足, 为暴雨(极端降水)的多发区域, 且受其影响严重。因此, 暴雨的形成机理和预报方法一直是中国气象界关注和研究的重点课题之一^[2]。城市下垫面的变化对暴雨影响的机理和过程一直是学术界关注的核心问题。景观城市化(城市下垫面中不透水区域)的扩张增加了下垫面的粗糙度, 使得辐合加强^[3-6]; 下垫面的改变使得不稳定能量增加^[7-8, 26], 相关的悬浮颗粒的增加导致云凝结核(CCN)来源的变化^[9-10]; 城市的发展, 其穹顶高度的改变及其相关过程使得降水系统分叉或者转移^[4, 11]。Horton等发现雷暴在城市比农村更频繁^[6]; 美国大城市气象试验(METROMEX)的结果显示, 夏季降水与城市化有关, 下风向效应使得顺风城市的降水量比平均值增加了5%~25%^[3, 12-13]; 也有研究指出城市区域的大小可以决定城市下风向降水的量级和分布^[13]。随着数值气象模式的不断发展和完善, 越来越多的研究者开始借助数值模拟的方法定量分析城市下垫面对降水的影响, 并尝试揭示其潜在的影响

收稿日期: 2018-05-18; 修订日期: 2019-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41621061) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41621061]

作者简介: 张杰(1993-), 男, 硕士生, 主要从事区域性暴雨模拟研究。E-mail: luck0213@foxmail.com

通讯作者: 史培军(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事环境演变与自然灾害研究。E-mail: spj@bnu.edu.cn

机制。基于数值模拟的研究在世界上许多城市地区都有开展,如美国纽约^[13]、日本东京^[14]、中国北京^[15]和广州^[16]。虽然众多研究者在这方面已经做了大量研究,很多文章也指出城市化进程在城市暴雨产生中扮演着重要的角色,但到目前为止,景观城市化对暴雨的影响机制仍然未得到具体的结论。

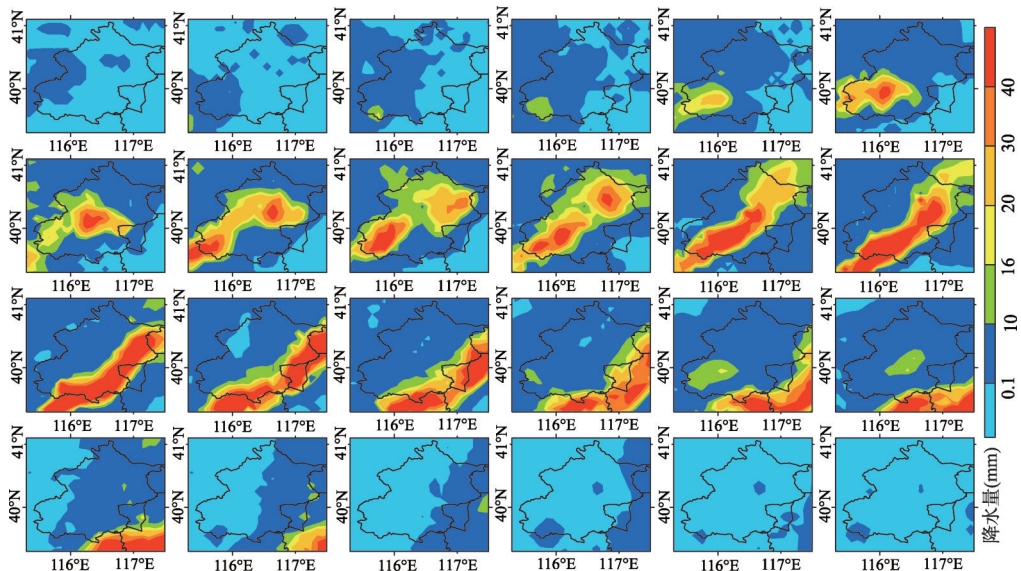
因此,在对以往的研究工作进行总结和分析的基础上,本研究应用WRF 3.8版本,尝试量化分析景观城市化对一次暴雨过程的影响,深化分析景观城市化对区域性暴雨影响的机理与过程,以期加深理解景观城市化对暴雨形成、发展过程的作用机理,为改进大都市区城市水患风险防御对策提供科学依据。

2 个例分析、研究区的选取和研究方法

2.1 暴雨过程案例概述

本文选取2012年7月21日北京地区一次典型暴雨过程,进行暴雨全过程的数值模拟,尝试探讨北京地区景观城市化进程对此次暴雨过程的影响。

2012年7月21日暴雨过程中,北京地区恰好处于副热带高压外围,主要受东移南下冷空气和西南气流的共同影响。西太平洋暖湿气流源源不断的向北输送,冷暖空气交汇于北京地区上空,高低空的天气形势场配置有利于形成长历时、高强度的降雨过程。导致北京地区普降大暴雨,甚至局地出现特大暴雨(图1)。此次暴雨的暴雨区中心从北京地区西南部向东北山前移动^[2]。从图1可以看出此次暴雨过程的降水从北京时间7月21日10时左右开始,直至7月22日4时之后,降雨云团东移减弱,暴雨过程基本结束。本次暴雨过程可以分为两个阶段^[2,20],7月21日10时至21日16时,暴雨主要是由冷空气入侵和地形作用产生的中小尺度对流系统产生,暴雨中心落区维持在北京地区南部,移动缓慢,为暖区降水。7月21日17时至7月22日4时随着冷空气的东移南下,大尺度天气过程驱迫中小尺度对流系统加强,进而随着南下气流的移动,暴雨中心落区也随之向北京



注:北京时间2012年7月21日08时至7月22日07时。

图1 2012年7月21日北京暴雨逐小时降水实况

Fig. 1 The observed hourly precipitation from 08:00 LST 21 July, 2012 to 07:00 LST 22 July, 2012 in Beijing

地区东南方向移动,移动速度较快,雨强较大,此阶段为锋面降水过程。

图2展现了暴雨过程发生前,大气中层500 hPa环流背景场,可知此次暴雨过程500 hPa高度温度场落后于位势场,北京地区处于高压槽的前方,这样的温压场配置会使得高空槽加深、加强,进而为暴雨过程的维持和发展提供了充足的动力条件,当低层大气中水汽充沛时,更易产生长历时,高强度的降水过程;同时当与地形和城市热岛效应产生的城市热对流相互作用时,局地区域性降水可能会加强^[18, 21]。

2.2 数据来源、模式描述和试验设计

本文使用了气象信息综合分析处理系统(Meteorological Information Comprehensive Analysis and Processing System, MICAPS)的站点实测数据、中国自动站与CMORPH(Climate Prediction Center Morphing Technique)降水产品融合的逐时降水量产品(<http://data.cma.cn/site/index.html>)和NCEP/NCAA(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)每6 h一次的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的FNL(Final Operational Global Analysis Data)资料以及北京地区不同时期的MODIS土地利用数据^[2]。利用MICAPS系统站点实测数据、中国自动站与CMORPH降水产品融合的逐时降水量产品,分析此次暴雨过程的天气形势、降水实况;利用NCEP/NCAR每6 h一次的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的FNL资料为WRF(Weather Research and Forecasting Model)模式模拟提供初始条件及边界条件;最后利用WRF模式输出的物理量,对此次暴雨过程进行诊断分析。WRF 3.8版本中提供了3种城市边界层方案,本文选取BEP城市陆面参数化方案,对此次暴雨过程模拟使用了BouLac边界层方案^[18],以识别三维城市化和自然景观陆面以及它们产生的垂直扰动和热对流^[19]。

模拟过程使用4层嵌套,网格中心点设置为(38.9°N, 115.3°E),每层网格数分别是:第一层(d01)网格数为 100×100 (分辨率为27 km),第二层(d02)网格数为 124×124 (分辨率为9 km),第三层(d03)网格数为 160×160 (分辨率为3 km),第四层(d04)网格数为 199×199 (分辨率为1 km),模式的初始驱动和边界数据使用FNL($1^{\circ}\times 1^{\circ}$)的数据。具体参数化方案的选取如表1所示,模式模拟区域和模式嵌套网格如图3所示。

本文使用了两个不同时期的土地利用数据(分辨率为1 km),图4中红色图斑为景观城市化类型。北京地区景观城市化(图4中的第13类)面积不断增加,1990年为923 km²,2000年为1136 km²,2010年为1891 km²^[24]。模拟过程选取模式中默认的2000年MODIS土地利用数据作为控制实验CTL。第一个测试使用与CTL模拟相同的方法,但使用2010年北京地区1 km \times 1 km高分辨率MODIS数据替换模式默认的2000年土地利用数

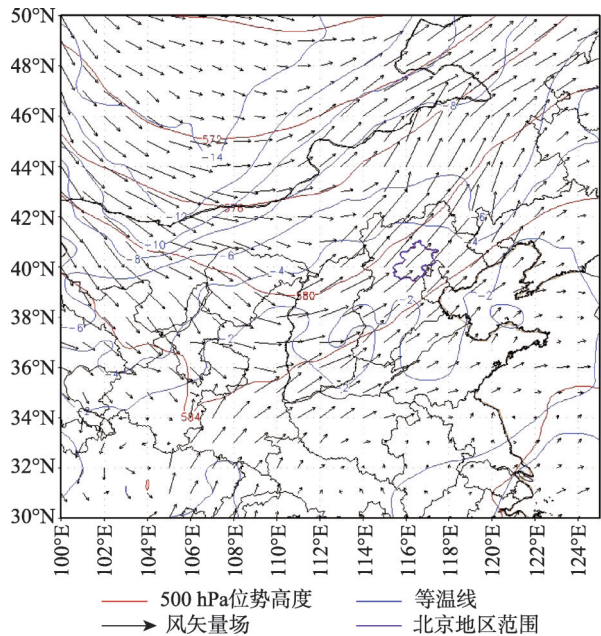


图2 北京时间2012年7月21日00时500 hPa天气环流场
Fig. 2 500 hPa weather system circulation situation field at 00:00 BT 21st July

表1 WRF 3.8模式中使用的参数化方案

Tab. 1 The weather research and forecasting model (WRF) building effect parameterization (BEP) scheme model setting	d01	d02	d03	d04
水平网格	100×100	124×124	160×160	199×199
网格间距	27	9	3	1
垂直层数			32	
时间步长(s)	90	30	10	3.33
微物理参数化方案		Lin et al. scheme		
积云参数化方案	Kian-Fritsch (new Eta)		None	
长波辐射方案	RRTM			
短波辐射方案	Dudhia shortwave radiation			
行星边界层方案	BouLac PBL			
地表模式	Noah LSM+BEP			
工商业建筑的高度	15 m (10%), 20 m (25%), 40 m (40%), 30 m (25%) 城市网格中最大垂直级别数为18			
高密度住宅的建筑高度	10 m (10%), 15 m (60%), 20 m (30%)			
低密度住宅的建筑高度	5 m (15%), 10 m (70%), 15 m (15%)			

据(下文简称2010 test);第二个测试,同样使用与CTL模拟相同的方法,但使用1990年北京地区1 km×1 km高分辨率MODIS数据替换模式中默认的2000年土地利用数据(下文简称1990 test)。

3 结果分析

3.1 模式模拟结果分析

3.1.1 逐小时降水分布图 从模拟结果输出的逐小时降水分布(图5)可以看出,WRF模式较好的模拟出了此次暴雨的整个过程。暴雨发生的时间与实况相同,通过对比CTL、2010 test和1990 test模式模拟逐小时降水分布结果可知,2010 test的模拟结果中暴雨雨强、暴雨落区和分布与实况(OBS)更接近,说明使用与实际情况更为接近的土地利用数据可以提高模式对暴雨过程的模拟能力。

3.1.2 24 h 累积降水结果分析 从WRF模式模拟的24 h累积降水图(图6)中可以看出,模式较好地模拟出了此次暴雨过程的两个暴雨中心和雨带分布。对比使用1990年和2010年土地利用数据模拟结果,1990 test、CTL和2010 test模拟的24 h累积降水超过150 mm的面积分别约为4705 km²、5673 km²和6551 km²,可以看出随着景观城市化区域的扩张累积降水大于150 mm的暴雨落区面积逐渐增大,同时暴雨落区的分布不再零散而是更加紧凑。

图7a是使用2010土地利用数据与使用2000土地利用数据CTL试验模拟24 h累积降水结果的差值;图7b是使用2010年与1990年土地利用数据模拟24 h累积降水结果的差

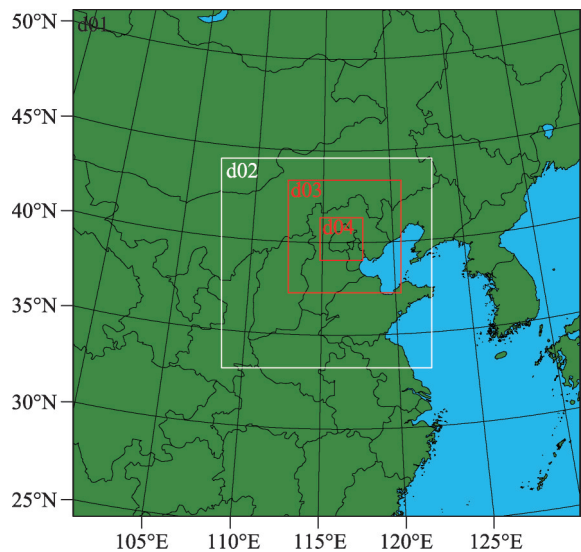


图3 WRF模式模拟区域及嵌套网格示意

Fig. 3 Domain configuration and location of the study area

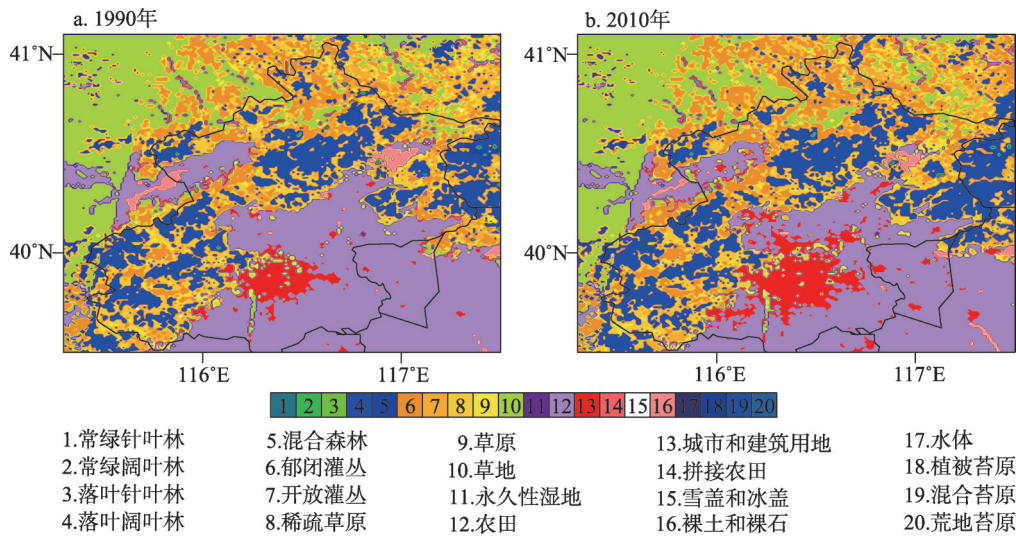


图4 WRF模式中所使用的北京地区高分辨率土地利用数据

Fig. 4 The high-resolution land use map in the weather research and forecasting model (WRF) building effect parameterization (BEP) scheme

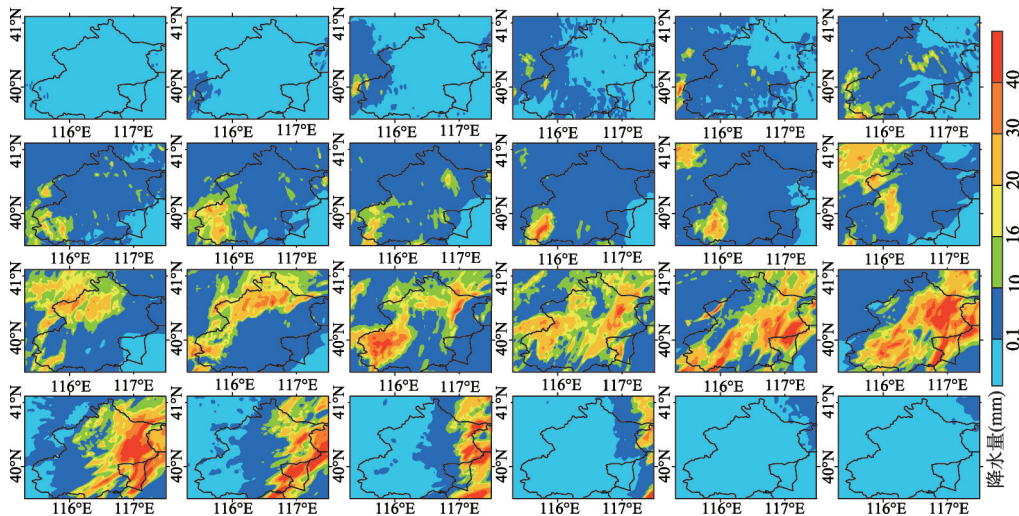


图5 2012年7月21日10时至7月22日9时模式模拟的北京暴雨逐小时降水

Fig. 5 The 2010 test simulated hourly precipitation from 08:00 LST 21 July, 2012 to 07:00 LST 22, July 2012

值。从这两张图中可以看出,此次暴雨过程,随着土地利用类型的改变,降水的增加主要集中在此次暴雨过程的两个暴雨中心。暴雨的分布不再分散,而是更加靠拢。

表2为此次暴雨过程使用3种不同土地利用数据的模拟结果中累积降水大于等于150 mm的面积和小时降水大于等于16 mm^①的持续时长。在不同的土地利用数据的模式模拟结果中,暴雨过程持续(小时降水量大于等于16 mm)时长均增加了1 h,但与实况相比,模式模拟的结果较实况更长(表2)。暴雨全过程(24 h)累积降水面积大于150 mm的面积随着城市化的进程不断增加,此外,2010 test与1990 test差值为1534 km²,2010

① 中国气象局规定,24 h降水量为50 mm或以上的降水称为强降雨,小时降水量大于16 mm或以上的强降雨称为“暴雨”^[30]

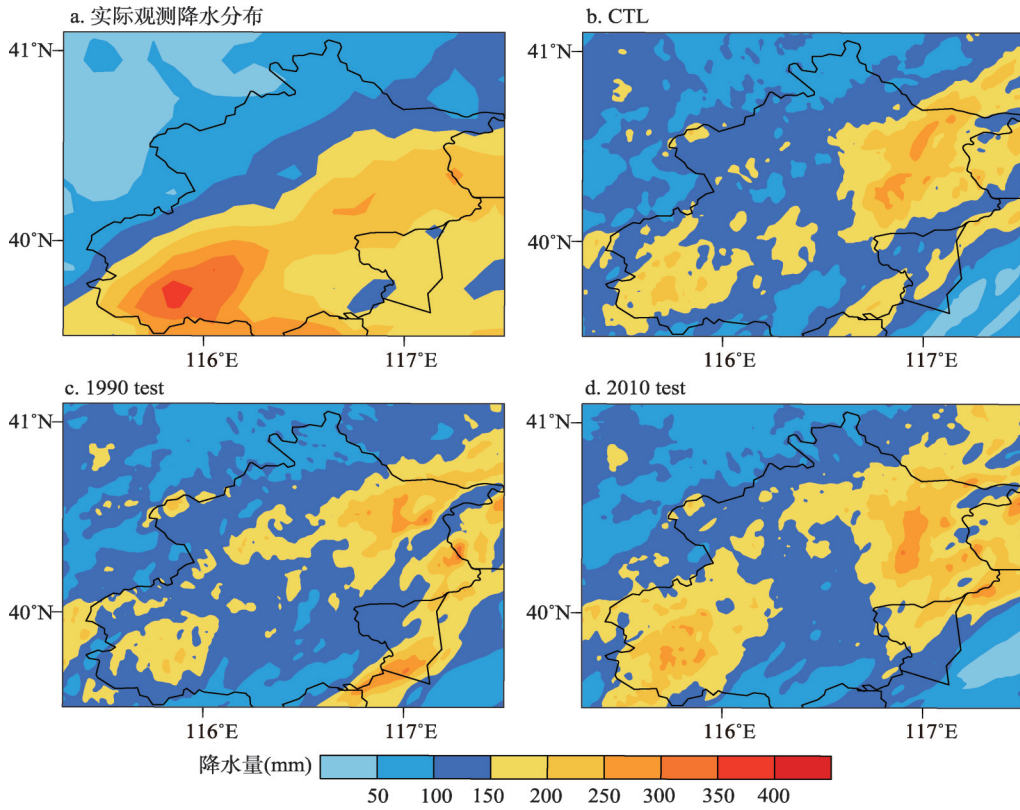


图6 2012年7月21日北京暴雨24 h 累积降水分布

Fig. 6 The observed and simulated 24 h accumulated precipitation from 08:00 LST 21, July 2012 to 07:00 LST 22, July 2012 in Beijing

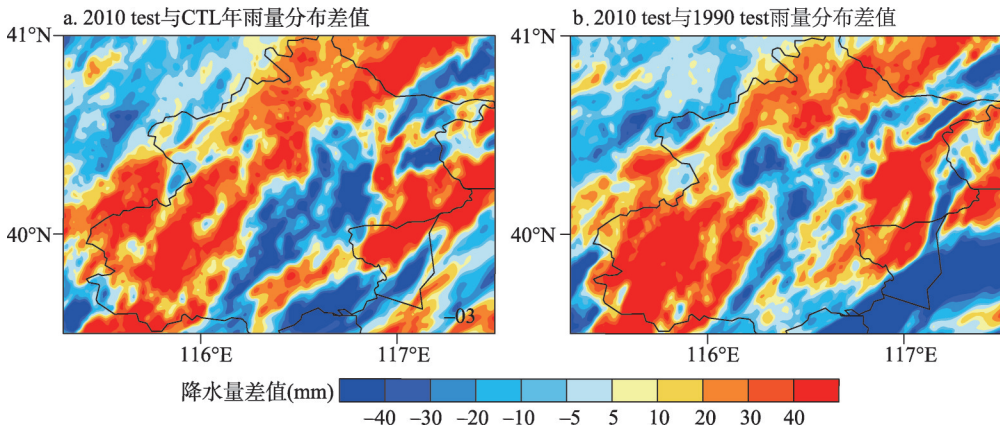


图7 2012年7月21日北京暴雨24小时累积降水差值

Fig. 7 The 24 h accumulated rainfall change from 08:00 LST 21, July 2012 to 07:00 LST 22, July 2012 in Beijing

test和CTL的差值为1513 km²，也说明城市化区域的大小也影响着暴雨的落区和分布以及雨量，2010年较之前的城市化程度更大一些，从而带来的影响也更明显。

3.2 土地利用变化对暴雨影响的潜在机理分析

3.2.1 低层风场 图8展现了此次暴雨过程发生前后，4个时次的大气低层（850 hPa）风

场。暴雨过程受到气旋的影响,西南风提供了大量的暖湿气流与东移南下的冷空气相遇,在华北地区产生降水过程。前3个时次,北京地区均处在粉色颜色填充区域内,可以看到在暴雨发生前和暴雨过程中,北京地区上空有充足的水汽。随着时间的推移和暴雨过程的不断发展,在第4个时刻,可以看到北京地区上空的水汽逐渐匮乏,暴雨雨带移出北京地区,北京地区此次暴雨过程基本结束。

3.2.2 最大不稳定能量(CAPE)和对流抑制能量(CIN)分析 CAPE值是指对流有效位能,其表征不稳定能量的大小,不稳定能量越大,越容易发生对流,从而为降水的产生提供动力和热力条件^[25]。图9分析了2012年7月21暴雨过程,北京地区降水较为集中的时段,7月21日16时至23时平均最大不稳定能量,可以看出,两次模拟过程的平均最大

表2 2012年7月21日暴雨过程主要降水参数对比
Tab.2 Comparison of main precipitation parameters in the rainstorm processes

	累计降水 ≥ 150 mm 面积(km ²)	小时降水 ≥ 16 mm 时长(h)
1990 test	4705	20
CTL	4726	20
2010 test	6239	21
2012 OBS(观测)	7097	16

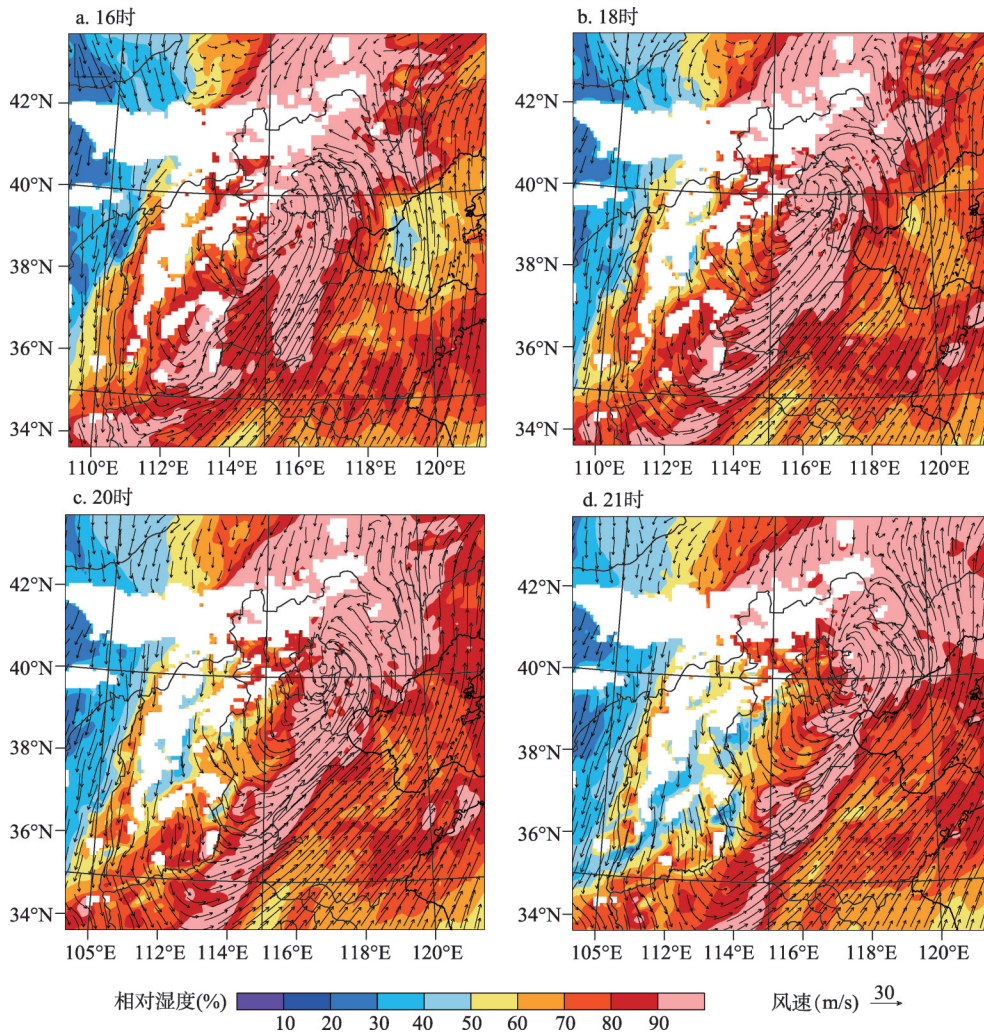


图8 2012年7月21日16时、18时、20时和21时暴雨过程的850 hPa风场和相对湿度

Fig. 8 850 hPa wind field and humidity on July 21, 2012 at four times (16:00 LST, 18:00 LST, 20:00 LST, 21:00 LST)

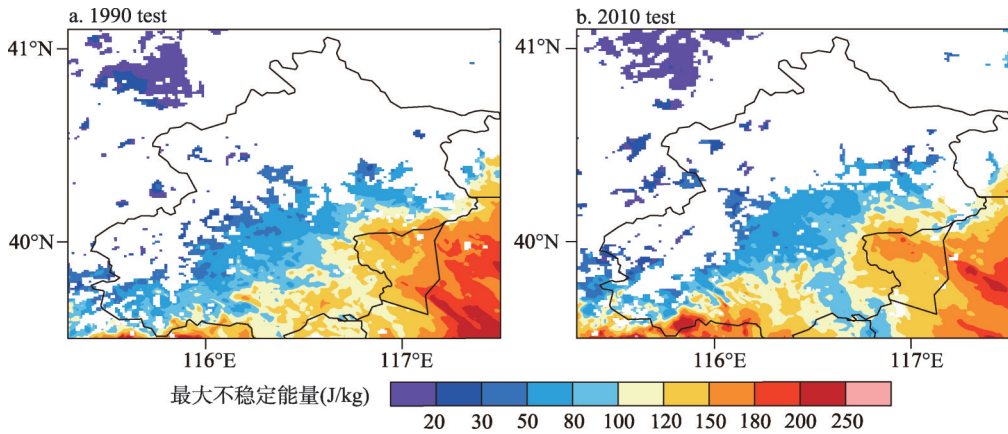


图9 2012年7月21日16时至23时北京地区平均最大不稳定能量分布
 Fig. 9 The average maximum convective available potential energy (CAPE) distribution on July 21, 2012 in Beijing (16:00 to 23:00 LST)

不稳定能量分布有一定的差别，1990 test中，不稳定能量主要集中在北京地区的东南部和南部，而2010 test中北京地区的不稳定能量存在两个较强的区域，一个在北京的西南部，另一个与1990 test中的位置相似，位于北京的东南部。图10是2010 test较1990 test不稳定能量的差值，可以看出，北京地区西南部，不稳定能量有明显的增加，而与北京地区城市区域相对应的位置，在2010 test中平均最大不稳定能量偏小（图9b），且在图10中可以看出与城市区域相对应的区域差值为负值，则说明由于城市区域的扩张，与城市区域相对应的区域不稳定能量在减少。此外，北京地区西南部最大平均不稳定能量有明显的增加，结合图8对风向和水汽的分析，可以认为，城市区域的扩张，对北京地区城市上风方向的降水有一定的促进作用。产生较强的不稳定能量，从而为暴雨和降水的产生提供相应的动力和热力条件。

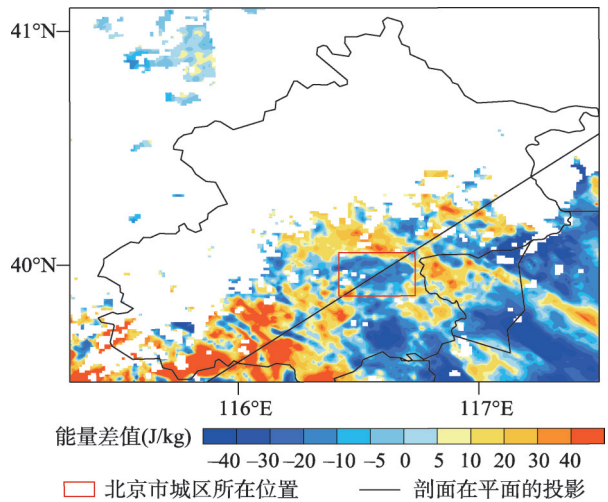
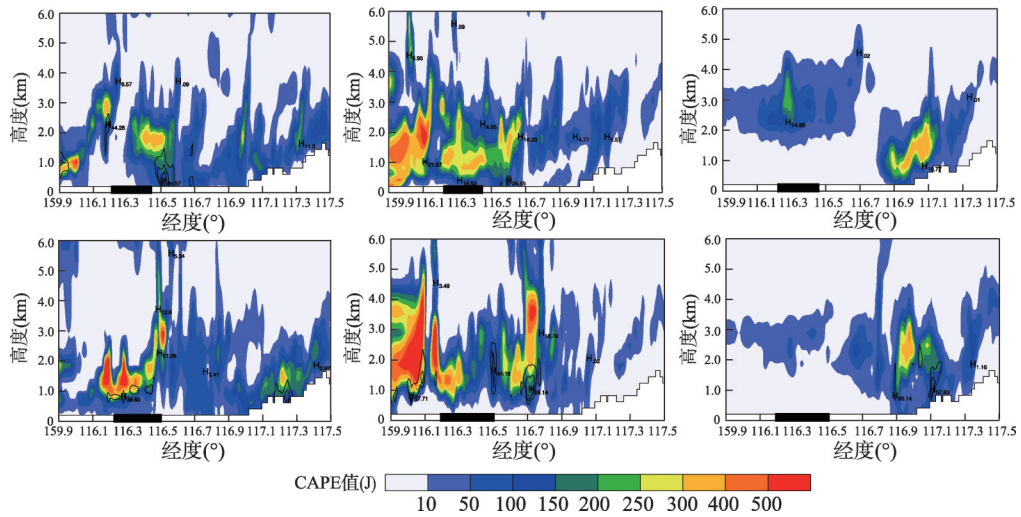


图10 2012年7月21日16时至23时北京地区平均最大不稳定能量2010 test和1990 test差值
 Fig. 10 The difference in the average maximum convective available potential energy between the 2010 test and 1990 test for the rainstorm event on July 21, 2012 in Beijing (16:00 to 23:00 LST)

在平面图分析的基础上，可以看出CAPE值的分布主要是东北—西南走向，同时此次暴雨的小时降水和24 h累积降水雨带分布均呈东北—西南走向，所以在图10的基础上，沿着图10中黑色实线对其进行剖面分析，红色矩形是北京城市区域所在的位置。图11分析了2012年7月21暴雨过程，暴雨发生前后3个时次的CAPE值分布。从1990 test的结果可以看出，7月21日16时北京景观城市化区域上空有CAPE值较大的中心。从垂直剖面图来看，随着时间的推移北京景观城市化区域上空和北京景观城市化区域剖面前



注: 黑色矩形为城市所在区域;第一行为1990 test;第二行为2010 test。

图11 2012年7月21日暴雨过程模拟结果平均最大CAPE值(颜色填充)和CIN值(线条)

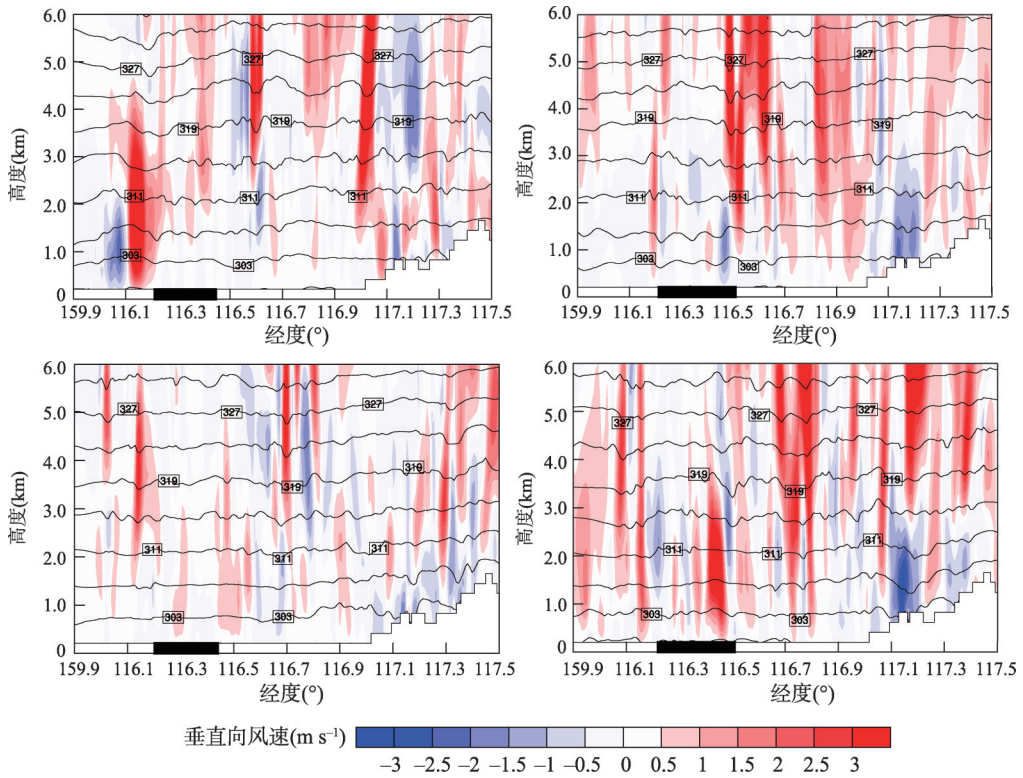
Fig. 11 The average maximum convective available potential energy (CAPE) and convective inhibition (CIN) values of the rainfall process simulation results on July 21, 2012 (contour). The urban area is marked with a solid black horizontal line.

The first row is the 1990 test and the second row is the 2010 test

方CAPE值增大,之后,CAPE值减少,低层区域的大气CAPE能量减弱。与此对应,2010 test结果显示,在2012年7月21日16时,北京景观城市化区域上空产生了较大的CAPE值中心,同时CIN也有一个较大值中心在北京景观城市化区域上空,CIN值是指对流抑制能量,表征对对流运动的抑制作用。此时,北京景观城市化区域上空的CAPE值受到CIN的抑制,并不容易产生对流抬升作用。随着时间的推移和暴雨的发展,强的CAPE中心主要集中在北京景观城市化区域剖面的前方和北京景观城市化区域剖面的后方。随着降水的减弱,CAPE中心也在减弱。

3.2.3 垂直速度剖面图 2012年7月21日暴雨过程的雨带分布均呈西南—东北走向,沿着垂直于雨带分布方向移动。考虑城市下垫面对暴雨过程的影响,所以,在做剖面分析时,沿着西南—东北向(雨带分布方向),且剖面投影经过北京地区景观城市化集中地区,以分析影响和表征暴雨过程的主要因素。影响暴雨产生的因素很多,主要分为水汽条件和动力条件^[28-29]。通常夏季暴雨的产生多伴随强对流过程,从而使得局地的降水量增大、降水强度增大^[26]。沿着图10黑色实线所示的剖面,分析暴雨发生过程中不同时段的气流垂直运动速度。北京时间18时为本次暴雨主要发生和发展的时间,1990 test结果显示,城市上空有上升运动;而2010 test结果则不同,在城市区域前方产生了较强的上升运动,在城市区域上空则是下沉运动和较弱的抬升作用,在城市区域后方产生了较强的上升运动,从而为降水的产生提供了动力抬升条件(图12)。

3.2.4 水汽通量散度 水汽通量散度表征单位时间内单位体积中水汽的净流失量,其值为正时表示水汽流失,为负时表示水汽的积聚^[27]。本文选取2012年7月21日暴雨过程18时数据沿着图10黑色实线做剖面分析,图13a展示了2010 test的模拟结果,水平方向上,景观城市化区域前方和后方大气低层水汽通量散度为正值,且水汽通量散度较强;图13b展示了1990 test的结果,分析可知,水平方向上景观城市化区域前方有一个水汽通量散度中心,在其后有一个负值中心,而在景观城市化区域的后方也存在一个水汽通量散度的正



注：黑色矩形为北京城市所在区域，左侧为1990 test；右侧为2010 test。

图12 2012年7月21日16时和18时气流垂直速度模拟结果剖面图

Fig. 12 Vertical velocity cross section of the model simulation for three times (16:00 LTS, 18:00 LTS, and 20:00 LTS) July 21, 2012. The urban area is marked with a solid black horizontal line. Left is the 1990 test; right is the 2010 test

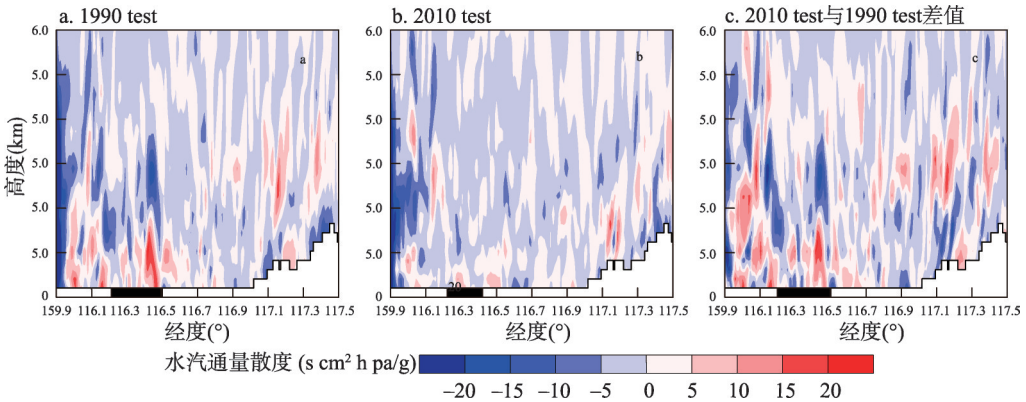


图13 2012年7月21日暴雨过程水汽通量散度模拟结果剖面图

Fig. 13 A cross-section of the water vapor flux divergence of the rainfall process simulation results on July 21, 2012. The urban area is marked with a solid black horizontal line

值中心。图13c展示了2010 test和1990 test的差值，可以看出，景观城市区域面积的增大，在水平方向上使其前方和后方的两个水汽通量散度中心正值增大，同时，景观城市区域上空的水汽通量散度负值中心也略有增大。

4 结论与讨论

本文选取北京地区2012年7月21日单次暴雨案例,研究景观城市化对北京地区降水过程的影响,在前人研究的基础上,选取对暴雨过程模拟较理想的模式参数化方案和模式驱动数据进行暴雨过程模拟研究,得出以下结论:

(1)此次暴雨过程历时短,降水强度大,伴有较强的对流过程,选取的模拟方案较好地模拟出了此次暴雨过程。当使用与实际情况更接近的土地利用类型数据时,模式的模拟结果与实况更加接近,从而可以较好地模拟出此次暴雨过程。

(2)从小时降水模拟结果来看,模式模拟的逐小时降水分布和暴雨中心与实况相近,暴雨发生的时次也相同,对比使用不同期的土地利用类型数据的模拟结果,可以看出,景观城市化使得暴雨持续更久,此次暴雨过程使用3期不同期土地利用类型数据的模拟结果小时降水量大于16 mm的时长分别为20 h (1990 test)、20 h (CTL)、21 h (2010 test),CTL与1990 test时长相同,2010 test较CTL和1990 test时长多1 h,但2012年7月21日暴雨时长观测值为16 h,比2010 test要少5 h,其原因仍需对WRF模式进行深入研究,同时理解暴雨产生机理,深入研究产生差别的原因。

(3)从模式模拟的暴雨全过程累积降水结果来看,模式模拟和实际累积降水分布相近,模式模拟出暴雨中心落区和雨带分布。对比使用不同期的土地利用类型数据的模拟结果,景观城市化对此次暴雨过程中暴雨落区分布的影响较为明显,1990 test、CTL和2010 test模拟结果显示暴雨过程24 h累积降水超过150 mm的面积分别约为4705 km²、4726 km²和6239 km²,暴雨过程24 h累积降水大于150 mm的区域CTL较1990 test增加了20 km²,2010 test较CTL增加了1513 km²,可以认为景观城市化进程对暴雨落区存在一定的影响。

(4)北京地区景观城市化使暴雨的发生更加聚拢在暴雨落区中心的位置,暴雨落区的分布更加紧凑,暴雨产生所需要的动力条件和能量条件都更加集中,暴雨发生所提供的能量有“强更强,弱更弱”的特征,对于暴雨发生提供较弱的能量区域产生降水的可能性有所降低。同时,由于城市区域的扩张,北京地区城市上风向的不稳定能量增多,产生降水的动力和热力条件增强,当水汽充沛的情况下,会产生较强的降水过程。

此外,影响暴雨产生的因素很多。景观城市化只是其中的一个重要的影响因子,模式对景观城市化的考虑主要包括地气相互作用的参数化方案,以及城市穹顶的边界层参数化方案,但很多人文因素并未考虑在其中。本文使用的是分辨率为1 km的MODIS数据,其空间分辨率偏低,模拟过程中没有考虑景观城市化密度的改变。事实上,景观城市化密度的改变,可能会对地气相互作用产生一定的作用,从而更进一步对降水所需要的动力和热力条件产生影响。本文也未考虑气溶胶对暴雨过程的影响。前人的研究,已经证实气溶胶对平缓的降水过程存在一定的作用,但其对暴雨过程的影响如何尚未明确,更进一步的研究需考虑景观城市化密度、气溶胶等因素对暴雨过程的影响。

参考文献(References)

- [1] Sun Jisong, Lei Lei, Yu Bo, et al. The fundamental features of the extreme severe rain events in the recent 10 years in the Beijing area. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 73(4): 609-623. [孙继松, 雷蕾, 于波, 等. 近10年北京地区极端暴雨事件的基本特征. *气象学报*, 2015, 73(4): 609-623.]
- [2] Yu M, Liu Y. The possible impact of urbanization on a heavy rainfall event in Beijing. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015, 120(16): 8132-8143.
- [3] Changnon S A. *Metromex: A Review and Summary*. Boston: American Meteorological Society, 1981.

- [4] Bornstein R, Lin Q. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(3): 507-516.
- [5] Thielen J, Wobrock W, Gadian A, et al. The possible influence of urban surfaces on rainfall development: A sensitivity study in 2D in the meso- γ -scale. *Atmospheric Research*, 2000, 54(1): 15-39.
- [6] Wang J, Feng J, Yan Z, et al. Nested high-resolution modeling of the impact of urbanization on regional climate in three vast urban agglomerations in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D21). Doi: 10.1029/2012JD018226.
- [7] Sun J, Na H E, Wang G, et al. Preliminary analysis on synoptic configuration evolution and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012. *Torrential Rain & Disasters*, 2012, 31(3): 218-225.
- [8] Shepherd J M, Burian S J. Detection of urban-induced rainfall anomalies in a major coastal city. *Earth Interactions*, 2002, 7(4): 1-17.
- [9] Diem J E, Brown D P. Anthropogenic impacts on summer precipitation in Central Arizona, U.S.A. *Professional Geographer*, 2003, 55(3): 343-355.
- [10] Mölders N, Olson M A. Impact of urban effects on precipitation in high latitudes. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 5(3): 1040-1060.
- [11] Loose T, Bornstein R D. Observations of mesoscale effects on frontal movement through an urban area. *Monthly Weather Review*, 2017, 105(5): 563-571.
- [12] Jr C S. Rainfall changes in summer caused by St. Louis. *Science*, 1979, 205(4404): 402-404.
- [13] Changnon S A, Shealy R T, Scott R W. Precipitation changes in fall, winter, and spring caused by St. Louis. *Journal of Applied Meteorology*, 1991, 30(1): 126-134.
- [14] Yeung J K. Summertime convective rainfall in the New York City-New Jersey metropolitan region. *Dissertations & Theses - Grad Works*, 2012.
- [15] Inamura T, Izumi T, Matsuyama H. Diagnostic study of the effects of a large city on heavy rainfall as revealed by an ensemble simulation: A case study of central Tokyo, Japan. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2011, 50(3): 713-728.
- [16] Guo X, Fu D, Wang J. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing city. *Atmospheric Research*, 2006, 82(1): 112-126.
- [17] Lo J C F, Lau A K H, Chen F, et al. Urban modification in a mesoscale model and the effects on the local circulation in the Pearl River Delta region. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, 46(4): 457-476.
- [18] Yoshikado H. Interaction of the sea breeze with urban heat islands of different sizes and locations. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1994, 72(1): 139-143.
- [19] Miao S G, Dou J X, Fei C, et al. Analysis of observations on the urban surface energy balance in Beijing. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(11): 1881-1890.
- [20] Jun S, Yun C, Yang S, et al. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part II: Preliminary causation analysis and thinking. *Meteorological Monthly*, 2012, 3(9): 1052-1056.
- [21] Horton R E. Thunderstorm-breeding spots. *Monthly Weather Review*, 1921, 49(4): 193.
- [22] Martilli A, Clappier A, Rotach M W. An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 104(2): 261-304.
- [23] Miao S G, Dou J X, Fei C, et al. Analysis of observations on the urban surface energy balance in Beijing. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(11): 1881-1890.
- [24] Cao Q, Yu D, Georgescu M, et al. Impacts of urbanization on summer climate in China: An assessment with coupled land-atmospheric modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(18): 10505-10521.
- [25] Sun J, Zhao S, Shenming F U, et al. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing area on July 21, 2012. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(3): 705-718.
- [26] Yang B, Zhang Y, Qian Y. Simulation of urban climate with high-resolution WRF model: A case study in Nanjing, China. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, 48(3): 227-241.
- [27] Miao S, Chen F, Li Q, et al. Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: A case study of heavy rainfall in Beijing on 1 August 2006. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2011, 50(4): 806-825.
- [28] Zheng S Y, Shu-Hua A L. Urbanization effect on climate in Beijing. *Climatic & Environmental Research*, 2008, 13(2): 123-133.
- [29] Zhu L T, Chen Y S, Lu L I, et al. Analysis of precipitation variation trend in Beijing City from 1951 to 2009. *Water*

Resources Protection, 2012, 28(3): 42-46.

- [30] Yu R, Li J. Hourly rainfall changes in response to surface air temperature over eastern contiguous China. *Journal of Climate*, 2012, 25(19): 6851-6861.

The impact of the urbanization process on rainfall in Beijing: A case study of 7.21 rainstorm

ZHANG Jie^{1,3}, SHI Peijun^{1,2,3}, YANG Jing^{1,2,3}, GONG Daoyi^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management Ministry of Emergency Management & Ministry of Education, Beijing 100875, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: This article used the Weather Research and Forecasting Model (WRF) version 3.8 and simulated rainfall event in the period of July 21 to 22, 2012 in Beijing as a case study, with consideration of different land use and cover data. The rainfall event was simulated using a physical parametrization scheme that included a multi-layered city dome model. The results of the hourly and accumulative rainfall simulation indicated that the expansion of the urban area made the rainfall last longer and it also led to bigger affected area by the rainfall. Based on the simulated rainfall event, the duration of hourly rainfall of more than 16 mm increased by 1 h between 1990 test and 2010 test, and the area of accumulative precipitation exceeding 150 mm over 24 h increased by 1534 km² over the same period. Further research is needed to determine the possible impact of changes in atmospheric aerosol particles produced by human activities in the urban area and the changes in landscape urbanization density on rainfall. Identifying the effect of landscape urbanization in metropolitan areas on rainfall will improve countermeasures for prevention of urban flooding and waterlogging risk. Future research will focus on improving the simulation effect of the model on the precipitation process. There was some discrepancy between the simulated and actual hourly precipitation in this study. Future work will investigate the parametric scheme of the model and the precipitation mechanisms it uses.

Keywords: regional rainstorm; WRF; diagnostic analysis; numerical simulation; urbanization; Beijing