张珊, 黄刚, 王君, 等. 2015. 城市地表特征对京津冀地区夏季降水的影响研究 [J]. 大气科学, 39 (5): 911-925. Zhang Shan, Huang Gang, Wang Jun, et al. 2015. Impact of urban surface characteristics on summer rainfall in the Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (5): 911-925. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1411.14199.

# 城市地表特征对京津冀地区夏季降水的影响研究

张珊<sup>1,3</sup> 黄刚<sup>1,2</sup> 王君<sup>3,4</sup> 刘永<sup>5</sup> 贾根锁<sup>4</sup> 任改莎<sup>6</sup>

1 中国科学院大气物理研究大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029

2 全球变化研究协同创新中心,北京 100875

3 中国科学院大学,北京 100049

4 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候一环境重点实验室, 北京 100029

5 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心,北京 100029

6石家庄市鹿泉区气象局,石家庄050200

本文利用京津冀地区 24 个气象站的日降水资料和耦合有单层城市冠层模式 (SLUCM) 的中尺度数值模 摘要 式 WRF 的模拟结果,研究了城市地表特征对京津冀地区夏季降水的影响。结果表明,在京津冀城市面积迅速增长 的近三十年(1981~2010),该地区大部分站点的降水量都呈现减少的趋势,减少最明显的站点主要集中在京津唐城 市区域,其中≥50 mm 的降水量减少趋势占总降水量减少趋势的 50%以上。城市扩张可能是造成京津冀降水时空格 局改变的因素之一。通过对比分析控制试验与敏感性试验的模拟结果,发现城市化引起的地表特征的改变使北京、天 津、唐山主要城市地区的降水量和降水频次都有明显减少,而城市群下风向的降水量和降水强度则明显增加和增强, 其中 50 mm 以上等级的降水量变化最为显著,贡献率在 60%以上。城市地表特征使北京、天津和唐山地区 50 mm 以上等级降水量的百分比下降了 6%~20%, 下风向地区增加了 8%。城市地表特征也影响了主要城市和城市群下风 向地区降水量的日变化结构,使北京和唐山几乎所有时段的降水量都有所减少,而城市群下风向降水量的增加主要 发生在白天。研究发现城市地表特征对深对流的抑制(加强)可能是造成京津冀地区降水减少(增多)的重要原因, 而由于城市地表蒸发量的改变引起的潜热通量和对流有效位能的改变则可能是引起深对流变化的重要因素。 关键词 京津冀 Weather Research and Forecasting model Urban Canopy Model 城市地表特征 城市化 降水 文章编号 1006-9895(2015)05-0911-15 中图分类号 P461 文献标识码 A doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1411.14199

### Impact of Urban Surface Characteristics on Summer Rainfall in the Beijing–Tianjin–Hebei Area

ZHANG Shan<sup>1, 3</sup>, HUANG Gang<sup>1, 2</sup>, WANG Jun<sup>3, 4</sup>, LIU Yong<sup>5</sup>, JIA Gensuo<sup>4</sup>, and REN Gaisha<sup>6</sup>

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Joint Center for Global Change Studies, Beijing 100875

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 Key Laboratory of Regional Climate–Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

5 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

#### 收稿日期 2014-06-09; 网络预出版日期 2014-11-27

资助项目 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目 2011CB309704,全球变化研究国家重大科学研究计划项目 2012CB955604,国家自然科学基金项目 41425019、41275083、91337105,高原大气与环境四川省重点实验室开放课题 PAEKL-2014-K2

作者简介 张珊, 女, 1988 年出生, 硕士研究生, 研究方向: 城市气候学。E-mail: 769175314@qq.com

通讯作者 黄刚, E-mail: hg@mail.iap.ac.cn

6 Meteorology Bureau of Luquan District, Shijiazhuang 050200

**Abstract** Utilizing daily precipitation data from 24 meteorological stations and results from the Weather Research and Forecasting (WRF) model / Urban Canopy Model (UCM), the impact of urban surface characteristics on summer rainfall in the Beijing–Tianjin–Hebei area was investigated. Results indicated that precipitation at most sites in this region has reduced during the last 30 years, and those sites whose precipitation has reduced the most are mainly centered in the Beijing–Tianjin–Tangshan metropolis. Urbanization is one of the possible factors affecting the precipitation in the Beijing–Tianjin–Hebei area. Comparison of the model results from the control run and sensitivity run indicated that rainfall and rainfall frequency clearly decreased in the Beijing–Tianjin–Tangshan metropolis due to the urban surface. Meanwhile, an increase in rainfall and rainfall intensity was apparent downwind of the urban agglomeration; precipitation above 50 mm changed significantly due to the urban surface, and the contribution to the total could be more than 60%. The percentage of rainfall above 50 mm declined by 6%–20% in the Beijing–Tianjin–Tangshan metropolis, while it increased by 8% downwind. The diurnal structure of rainfall changed due to urbanization: precipitation in Beijing and Tangshan mainly reduced due to urbanization, and the increase downwind occurred mainly in daytime. The findings of this study suggest that the inhibition or enhancement of deep convection, as influenced by changes in latent heat flux and convective available potential energy due to the urban surface, may explain the changes in precipitation.

Keywords Beijing-Tianjin-Hebei, Weather Research and Forecasting model, Urban Canopy Model, Urban surface characteristics, Urbanization, Precipitation

# 1 引言

在气候学意义上,城市化主要是指由于人类活 动而引起的土地利用变化,进而使得陆面物理学属 性(反射率、热传导率、波文比和热容量等)和动 力学性质(粗糙度等)发生改变的过程 (Oke, 1982)。 城市因其较小的反照率、较大的热容量以及不可渗 透性,使其能量收支、温度和湿度等发生改变进而 影响城市及其周边的区域气候。随着近年来洪涝和 干旱的频繁发生,城市化对降水的影响也越来越受 到人们的关注。早在 1921 年, Horton (1921) 就指 出大城市附近更容易产生暴雨,之后 Changnon (1968, 1979) 和 Huff and Changnon (1972) 通过城 市气象综合观测实验(METROMEX)发现城市化 引起圣路易斯城市及其下风向 50~75 km 区域的降 水在暖季增加了 9%~17%,并指出城市化对降水 的影响在中尺度对流强迫占主导地位的暖季较为 明显。随后不断有新的观测和模拟结果支持 METROMEX 计划的研究结论 (Chow and Chang, 1984; Jauregui and Romales, 1996; Burian and Shepherd, 2005)。Shepeherd and Burian (2003) 通过 热带测雨任务卫星(TRMM)资料分析了休斯敦地 区降水的时空变化,发现城市下风向 30~60 km 区 域的月平均降水量增加了 28%, Chen et al. (2007) 发现城市化使得台北午后雷暴频率增多 67%。 Niyogi et al. (2011)、Yang et al. (2014) 指出强对流 系统在城市上风向分裂后又在下风向合并,这可能

是引起城市下风向强降水增多的原因。最近又有一些学者提出城市下垫面局地蒸发的减少以及城市 气溶胶的气候效应可使降水减少(Givati and Rosenfeld, 2004; Kaufmann et al., 2007; Rosenfeld et al., 2007; Wang et al., 2012)。Guo et al. (2005)利用 第五代中尺度模式 (MM5)对北京一次强流天气过 程进行了数值模拟,指出城市下垫面引起了该地区 (尤其是市区)累计降水量的减少。Zhang et al. (2009)通过对北京1981~2005年站点降水资料的分 析,指出北京东北部夏季降水的减少可能与城市扩张 有一定关系,并设计了几种不同的下垫面情景模拟两 次强降水过程,结果显示城市扩张使局地蒸发减少、 感热通量增加、边界层水汽混合更加均匀,对流有效 位能降低,从而抑制了对流系统的发生发展。

近些年,随着城市不断发展和扩张使得城市更加集中,形成城市群。研究表明,城市群会使得热岛更集中、更强 (Chen et al., 2006; He et al., 2007)。 国内关于城市群城市化过程对降水的影响问题已开展不少研究工作(黎伟标等, 2009; 钱嘉星等, 2010; Li et al., 2011;蒙伟光等, 2012; Wan et al., 2013),这些工作多数利用观测资料进行分析(黎伟标等, 2009;钱嘉星等, 2010; Li et al., 2011),也有一些工作通过数值模拟对对流降水的真实个例进行分析 (蒙伟光等, 2012; Wan et al., 2013)。但仅用观测资料很难将城市化对降水变化的影响从气候内部 变率中分离出来,而天气个例分析的研究结果存 在一定的不确定性。此外,由于降水过程的复杂 性,不连续性以及较强的局地性,不同城市对降水 的影响存在很大的差异。因此,需要对更多的城市 和城市群采用更长时间的数值模拟来探究城市化 对降水的影响。本文将针对京津冀地区,利用日降 水观测资料和 WRF/UCM 数值模式的模拟结果,探 讨该区域由于城市化而引起的地表特征改变对夏 季降水的影响。研究将以日降水量≥0.1 mm 为标准 统计夏季降水发生的频次。

#### 2 京津冀城市群夏季降水量的变化特征

京津冀城市群是中国三大城市群之一,在过 去三十年里京津冀的城市面积迅速增长。京津冀 地区位于温带季风区,其降水主要集中在夏季 (6~8 月),可占全年总降水量的75%~85% (Huang et al., 2011),其中在7月下半月和8月上 半月降水最为集中。受东亚夏季风的影响,京津 冀降水年际变化很大(图 1)。京津冀地势特点为 西北高,东南低(图 4b),降水分布与地形存在一 定的关系,降水量的高值区位于燕山和太行山山 前迎风坡及东南沿海地区(张健等,2010),西北 地区降水以小雨为主,降水日数较多而总降水量 较少,而东南沿海地区大雨和暴雨发生较多。

1990年代后期至 21 世纪初京津冀地区一直处 于降水偏少期(图 1),与 1990年代之前相比,降 水的年际变化幅度明显减小,除了气候系统的自然



图 1 1961~2010 年京津冀地区夏季降水量的年际变化(单位: mm)。 斜线和方程分别表示回归线和对应的回归方程

Fig. 1 The interannual variation of summer rainfall (unit: mm) in the Beijing–Tianjin–Hebei area during 1961–2010. The regression equation is indicated in the top-right corner, and the corresponding regression line (downward-sloping, left to right) is shown

变率,人类活动也可能存在一定影响。图2显示的 是京津冀地区 24 个气象站 1981~2010 年夏季降水 量的线性变化趋势的空间分布。可以看出,在城市 化发展迅速的近三十年,只有3个站点(廊坊、泊 头、黄骅)的降水量略有增加,最大变化趋势值仅 为6mm/10a。而其余站点均表现出负的变化趋势, 其中有11个站点通过了80%水平的显著性检验。降 水减少比较明显的站点主要集中在京津唐城市区 域,北京、密云和唐山站点降水量的减少趋势均在 -60 mm/10 a 以上,天津宝坻和塘沽站点的减少趋 势也分别达到了-45.7 mm/10 a 和-34.1 mm/10 a。 另外,大部分站点的降水频次也呈现出负的变化趋 势(图略),最大达到了-3.4 d/10 a。京津唐区域 各站点的降水强度也存在一定的减少趋势(图略), 减少值在(-1.3~-0.25 mm/10 a)之间。为了研 究不同等级的降水对总降水变化的相对贡献,本文 将日降水划分成10个等级:0~5mm,5~10mm, 10~15 mm, 15~20 mm, 20~25 mm, 25~30 mm, 30~40 mm, 40~50 mm, 50~100 mm, ≥100 mm, 图3给出了密云、北京、唐山和塘沽4个站点不同 等级降水量变化趋势的贡献率(每种等级降水的变 化趋势与总降水变化趋势的绝对值的百分比)。可 以看出,北京和密云站几乎所有等级降水变化的贡 献率都为负, 唐山站只有 10~15 mm 和 40~50 mm 等级的降水表现为正的贡献率,塘沽站中等强度降水 (10~25 mm) 和 40~50 mm 等级降水的贡献率为 正,其他等级降水的贡献率都为负。其中,北京、唐 山和塘沽站点 50 mm 以上等级降水量变化的贡献率 均在一70%以上, 密云站点的也在一50%左右, 而 50 mm 以上的降水量仅占总降水量的 30%左右, 这与 Zhang et al. (2009)、李书严和马京津 (2011) 对北京 地区的研究结果相一致,说明京津唐城市区域降水量 的减少很大程度上是由极端降水量的减少引起的。

城市化作为人类活动的重要表现形式,对局 地气候有着很大影响。近 30 年来京津冀地区城市 化进程之快,对于其对该地区夏季降水变化的影 响,我们很难从观测资料中分离出来。因此,在 下一节我们将利用 WRF/SLUCM 模式,通过数值 试验,探讨城市化引起的地表特征的改变对京津 冀夏季降水的影响。

### 3 试验设计

本文采用的模式为耦合有单层城市冠层模式



图 2 京津冀地区 1981~2010 年夏季降水量线性变化趋势的空间分布 (单位: mm/10 a)。 "+"和 "\*"号分别表示通过 80%和 95%水平的 显著性检验

Fig. 2 The spatial distribution of the linear trends in 1981–2010 summer rainfall in the Beijing–Tianjin–Hebei area (units: mm/10 a). The "+" and "\*" symbols signify the confidence levels of 80% and 95%, respectively



图 3 密云、北京、唐山和塘沽站点不同等级降水量线性变化趋势的 贡献率

Fig. 3 The contributions of the linear trends of the different classes of precipitation at the sites of Miyun (black), Beijing (green), Tangshan (blue), and Tanggu (red)

(SLUCM)的中尺度天气模式 WRF(V3.5.1)。 SLUCM 最早由 Kusaka et al. (2001)和 Kusaka and Kimura (2004)提出和建立,随后由 Chen et al. (2004)、Miao et al. (2009)进行了改进并将其耦合到 中尺度模式 MM5 和 WRF 中。该城市冠层模式不 仅考虑了道路的朝向和几何特征以及建筑物的阴

影和反射作用,还考虑了太阳高度角的变化,对建 筑物楼顶、墙面和路面的热力作用分别进行计算 (Chen et al., 2011),较好地改进了模式对城市热力学 和动力学效应的描述。WRF/SLUCM 的模拟结果可 以很好地再现城市热岛效应的日变化和空间分布、 风向和风速的日变化、山谷和热岛局地环流、边界 层的湍流活动以及夜间低空急流等特征 (Miao and Chen, 2008; Lin et al., 2008; Miao et al., 2009; Kusaka et al., 2009; 蒙伟光等, 2010), 也能较好地 描述强对流天气过程中气象要素场的变化及降水 分布情况(张朝林等,2007;吴风波和汤剑平,2011; 郑祚芳等, 2013), 而且大多数情况下模拟结果比 没有耦合 UCM 的要好 (Miao et al., 2010; 张艳霞 等,2013)。因此可以用来进行城市化对气候变化 影响的预报和评估。本文模拟区域配置为三重嵌 套,水平分辨率分别为 30 km、10 km 和 3.3 km,投 影方式为兰勃特,最外层模拟区域的中心点位于 (38°N, 118°E),模式垂直方向分为35层,顶层气 压为 50 hPa。模拟区域见图 4,最内层的 D3 区域 为本文重点分析的京津冀地区。模拟过程中采用的 物理参数化方案包括: Rapid Radiative Transfer Model 长短波辐射方案(RRTM)(Iacono et al., 2008)、Single-Moment 5-class scheme 云微物理参数 化方案(WSM5)(Hong et al., 2004)、K-F(Kain-Fritsch) 积云对流参数化方案 (Kain, 2004)、YSU (Yonsei University) 边界层方案 (Noh et al., 2003) 以及 NOAH 陆面过程模式(Chen and Dudhia, 2001) (嵌套 UCM)。模拟使用的初始场和边界场由 6 h 间隔的 NCEP (National Centers for Environment Prediction) 1°×1°的 FNL (Final Operational Global Analysis)资料提供,模拟时间从 2008~2010 年每年 的 5 月 21 日 08 时积分至 9 月 1 日 08 时(北京时 间,下同),每1小时输出一次模拟结果,研究只 对 D3 区域 6~8 月的结果进行分析。

模拟使用的土地利用数据为 Earth Observation of Climate Change (EOCC)研究小组 (见 http://green.tea.ac.cn/[2014-04-23])研制的遥感数据 产品 (Model Land Cover Data sets version 1.0) (Hu and Jia, 2010),其中包括 1990、2000和 2009 三个 年代三种空间分辨率 (30 km, 10 km, 3.3 km)的 数据。研究设计了三组下垫面情景下的对比试验 (图 5): (1) U09 (控制试验,图 5a),用上文提到 的 2009 年遥感数据产品更新 WRF 模式中默认的下



图 4 数值试验的模拟区域和地形分布(单位:m):(a) D1、D2和D3的区域嵌套配置;(b)D3(京津冀)区域





图 5 WRF/UCM 模拟中的三种土地利用情景(红色代表城市):(a)用 2009 年的遥感数据产品更新 WRF 模式中默认的下垫面土地利用信息;(b)同(a),但为 1990 年;(c)没有城市

Fig. 5 The land-use classifications used in the Weather Research and Forecasting / Urban Canopy Model simulations, with the urban land-use fraction updated based on (a) 2009 and (b) 1990 remote sensing data products. (c) No urban surface

垫面土地利用信息(基于 MODIS 土地覆盖分类); (2)U90(敏感性试验,图 5b),用 1990年的遥 感数据产品替代 WRF 模式中默认的下垫面土地利 用信息;(3)NoUB(敏感性试验,图 5c),在WRF 模式默认的土地利用信息的基础上用周围的其他 土地利用类型插值替代城市部分,即没有城市的情 景试验。图 5a 中黑色实线框起来的区域分别代表 北京、天津、唐山、石家庄城市区域以及将要在 4.2 节中介绍的 DOWN 区域。

### 4 结果分析与讨论

#### 4.1 模式评估

本节选用 TRMM3B42 卫星观测日降水资料 (水平分辨率 0.25°×0.25°)和中国气象科学数据 共享服务网提供的地面气温资料(水平分辨率 0.5°×0.5°)与控制试验(U09)的模拟结果进行对 比,温度资料是基于中国地面高密度台站数据(约 2400个国家级气象观测站),利用 ANUSPLIN 软件 的薄盘样条法(TPS, Thin Plate Spline)进行空间插 值生成的格点化数据集。图 6 为京津冀地区 2008~ 2010年的模拟和观测的夏季平均降水量(图 6a, b) 和地面气温(图 6c, d)的空间分布,可以看出, 模式基本能模拟出降水和温度的分布形态,部分区 域模式对降水的模拟偏强,与 TRMM 相比,模式 模拟的降水在北京偏北和东北部存在一个虚拟的 强降水中心。除了模式模拟存在偏差外,TRMM 本 身对日降雨量的估算也可能偏小(骆三等,2011)。 模式模拟的2m气温除了城市区域比观测数据偏高 1~2℃,其他区域与观测基本吻合。同时,我们还 计算了模拟的降水和温度与对应的观测之间的空



图 6 京津冀地区 3 年 (2008~2010) 夏季平均的 (a, b) 降水量 (mm) 和 (c, d) 2 m 温度 (℃) 的空间分布: (a, c) 模拟 (U09 的结果); (b, d) 观测

Fig. 6 Spatial pattern of 3-year (2008–2010) averaged (a, b) summer rainfall (units: mm) and (c, d) temperature (units: °C) at 2-m height in the Beijing–Tianjin–Hebei area: (a, c) Simulation (Expt U09); (b, d) observations

间相关系数,计算得出京津冀夏季平均降水量、降水频次、2 m 气温的空间相关系数分别为 0.404、 0.524、0.958,均通过了 99%水平的显著性检验。 其中模式对小雨和暴雨频次的空间分布模拟较好, 与观测之间的相关系数分别达到了 0.716 和 0.582。

### **4.2** 城市地表特征对京津冀夏季降水量、降水频次 和降水强度的影响

图 7 显示的是控制试验(U09)与敏感性试验 (U90 和 NoUB)夏季平均降水量和降水频次之差 的空间分布,可以看出京津冀地表特征的改变影响 了降水的空间分布格局。由图 7a 和 7b 可见,除京 津冀东北角的正值区外,其他大部分地区都为负值 区。与 U90 和 NoUB 相比,U09 模拟的降水量在北 京、天津、唐山主要城市区域明显减少,而在石家 庄、保定等城市比较分散的区域降水量减少或增加 的情况并不明显。表1给出了区域降水量变化的具体值,其中北京、天津和唐山城市区域平均的U09与NoUB降水量的差值分别为-98mm、-71.3mm和-105.3mm,而在石家庄,U09与U90的差值为负,U09与NoUB的差值却为正,这说明城市地表特征对降水的影响与城市所在的位置和大小都存在一定关系。关于城市地表特征影响降水的内在机理将在4.5节进行讨论。图8a、b和c分别给出了北京、天津、唐山城市区域10m高度的风向玫瑰图(控制试验U09的结果)。可以看出这三个区域夏季都以偏南气流为主,北京和唐山南风频率最大,其次为东南风和西南方,天津以东南风频率最大,偏南气流带来的暖湿空气是京津冀夏季降水形成的重要原因。结合850hPa风场(图略),可以看到,京津冀地区大气低层为一致的西南气流。因此,



图 7 (a、b) 控制实验与敏感性试验夏季降水量(单位: mm)和(c, d)降水频次(单位: d) 之差的空间分布:(a, c) U09 与 U90 之差;(b, d) U09 与 NoUB 之差

0

-2

-8

-6

-4

4

2

6

8

d

Fig. 7 Spatial patterns of the differences in (a, b) summer precipitation (units: mm) and (c, d) rainfall frequency (units: d) between the control run and sensitivity run: (a, c) ExptU09 minus ExptU90; (b, d) ExptU09 minus ExptNoUB

(1)



图 8 3 年夏季平均的风向玫瑰图(U09的模拟结果,图中数字表示风速大小): (a) 北京; (b) 天津; (c) 唐山 Fig. 8 Summer-averaged wind rose of three years from Expt U09, the numbers represent the wind speed: (a) Beijing; (b) Tianjin; (c) Tangshan



		降水量之差值/mm					
	北京	天津	唐山	石家庄	DOWN	京津冀地区	
ExptU09-ExptU90	-46.90	-89.39	-143.63	-29.67	50.55	-23.79	
ExptU09-ExptNoUB	-98.70	-71.33	-105.34	1.847	23.97	-34.46	

图 7a 和 b 东北角的降水正值区正好位于三个大城市的下风向交集处,这与前人关于城市化使得下风向降水增多的研究结论相一致 (Chow and Chang, 1984; Shepherd et al., 2010)。将由于城市地表特征的改变而引起降水明显增多的区域定义为 DOWN(图5),城市扩张使该区域降水量增加了23~50 mm(见表1)。4.3 节和4.4 节将分别讨论该区域不同等级降水对总降水变化的贡献以及降水量的日变化特征。

从图 7c 和 d 可见,城市地表特征使京津冀大部分地区的降水频次都有所减少,其中在北京、天津、唐山城市比较集中的区域最为较明显,最大减少天数可达 7 天以上,只有在京津冀西部和西南很小的区域存在降水频次变化正值区。图 9 是控制试验(U09)与敏感性试验(U90, NoUB)降水强度(总降水量与总降水频次之比)之差的空间分布图。可以看出,地表特征的改变使北京、天津和唐山主要城市及周边的大部分地区的降水强度减弱,最大可减弱 10 mm/d,而使城市群下风向(DOWN)、天津西北以及北京西北等零散区域降水强度增强,其中 DOWN 区域的增强能达 8 mm/d 以上。

### **4.3** 城市地表特征对京津冀夏季不同等级降水的 影响

为了说明由于城市化而引起的地表特征的改

变对哪种级别降水的影响比较显著,本节同样将 日降水划分成10个等级:0~5 mm,5~10 mm, 10~15 mm,15~20 mm,20~25 mm,25~30 mm,30~40 mm,40~50 mm,50~100 mm, >100 mm。图10分别给出了U09与NoUB模拟的 五个区域不同等级降水量(图10a)和降水频次(图 10b)之差的贡献率:

$$C = (P_{\rm U09} - P_{\rm NoUB}) / \left| \sum (P_{\rm U09} - P_{\rm NoUB}) \right| \times 100\%$$

式中, C 为贡献率, P 表示每种等级的降水量或降 水频次(下标代表试验名称), ∑为求和符号。图 10 中 Beijing, Tianjin, Tangshan, DOWN 分别代 表图 5a 中黑框对应的区域(下同), Beijing– Tianjin–Hebei 则代表整个京津冀地区(D3)。可以 看出城市下垫面使北京(黑色实线)和京津冀地区 (紫色实线)所有等级的降水量和降水频次都有所 减少, 唐山城市区域(红色实线)除 5~20 mm 等 级的降水略有增加外,其他等级的降水量和降水 频次都有所减少,而天津城市区域(绿色实线)只 有 0~5 mm 的小降水事件和 50 mm 以上的极端降 水事件表现为负的贡献率,其中 50 mm 以上等级 的降水量的负贡献率达到了 140%。城市地表特征 对天津降水的影响和北京相比有明显的差异,这



图 9 同图 7, 但为降水强度之差(单位: mm/d)

Fig. 9 As in Fig. 7, but for the difference in precipitation intensity (units: mm/d)



图 10 U09 与 NoUB 模拟的北京、天津、唐山、京津冀及 DOWN 地区不同等级(a) 降水量和(b) 降水频次之差的贡献率 Fig. 10 The relative change in (a) rainfall and (b) precipitation frequency for the different classes of precipitation in the regions of Beijing (black), Tianjin (green), Tangshan (red), Beijing–Tianjin–Hebei (purple), and DOWN (blue) due to urbanization (U09 minus NoUB). "DOWN" means the downwind area of urban

可能是天津临近渤海,城市热岛与海风环流相互 作用的结果 (Shepherd et al., 2010)。从下垫面改变 对 DOWN 区域降水的影响来看(蓝色实线),城市 化主要引起了该区域 40 mm 以上等级降水量和降 水频次的增加,其他等级的降水都表现为负的贡 献率。由图 10a 可见,三个城市区域 50 mm 以上等 级的降水量的负贡献率都在 60%以上,而 50 mm 以上的降水量占总降水量的比例在 30%~40%之 间,这说明城市地表特征可能会使极端降水占总 降水的比例下降。表 2 和表 3 分别给出了上述五个

#### 表 2 控制试验与敏感性试验极端降水量(≥50 mm)的百 分比

Table 2	The percentage	of extreme	precipitation	in	the
control ru	in and sensitivity	run			

	极端降水量百分比				
区域	U09	U90	NoUB	U09-U90	U09-NoUB
北京	27.6%	28.3%	35.4%	-0.7%	-7.8%
天津	34.0%	55.6%	53.7%	-21.6%	-19.7%
唐山	42.6%	51.5%	49.1%	-8.9%	-6.5%
京津冀地区	30.4%	32.0%	37.6%	-1.6%	-7.2%
DOWN	44.8%	34.5%	36.8%	+10.3%	+8.0%

表 3 控制试验与敏感性试验极端降水 (≥50 mm) 频次的 百分比

Table 3The percentage of extreme rainfall frequency inthe control run and sensitivity run

	极端降水频次百分比					
区域	U09	U90	NoUB	U09-U90	U09-NoUB	
北京	3.7%	4.4%	4.7%	-0.7%	-1.0%	
天津	6.4%	9.4%	10.0%	-3.0%	-3.6%	
唐山	6.6%	9.1%	8.6%	-2.5%	-2.2%	
京津冀地区	4.3%	5.2%	5.1%	-0.9%	-0.8%	
DOWN	7.0%	5.2%	5.5%	+1.8%	+1.5%	

区域不同试验的 50 mm 以上的降水量和降水频次 占总降水的百分比,从中可以看出,地表特征的 改变确实使北京、天津和唐山城市区域极端降水 量和极端降水频次的百分比有不同程度的下降, 降水量的减少在 6%~20%之间,降水频次的减少 在 0.8%~3.6%之间。而在 DOWN 区域, 50 mm 以 上等级的降水量和降水频次的百分比分别增加了 8%和1.5%。

#### 4.4 城市地表特征对京津冀夏季降水日变化的影响

由于城市化而引起的地表特征的改变使得主要城市地区降水减少,而城市群下风向降水增多,这种变化在一天中哪些时段比较明显,需要进一步的探究。图 11 给出了 U09 和 NoUB 模拟的六个区域夏季降水量的日变化曲线。就整个京津冀地区的平均情况而言(图 11f),下垫面的改变导致一天中所有时段的降水量都有所减少,但对降水量的日变化结构没有显著影响:两组实验得到的降水量都在上午 08 时和下午 15 时左右存在一个峰值,而在夜间 22 时达到最低值。就北京、天津和唐山地区而言,城市地表特征对降水量的日变化结构有着明显的影响:在北京地区(图 11a),U09 几乎所有时段的降水量与 NoUB 相比都有所减少,尤其在傍晚至第二天凌晨这段时间,NoUB 模拟的降水量在傍晚(18:00~20:00)出现一个峰值,而相应的时段 U09



图 11 U09 和 NoUB 模拟的夏季降水量的日变化(单位: mm):(a) 北京;(b) 天津;(c) 唐山;(d) 石家庄;(e) DOWN;(f) 京津冀地区。0800 的值代表的是 07:00~08:00 的累积降水量,依次类推

Fig. 11 Diurnal variation of summer precipitation based on ExptU09 and ExptNoUB (units: mm): (a) Beijing; (b) Tianjin; (c) Tangshan; (d) Shijiazhuang; (e) DOWN; (f) Beijing–Tianjin–Hebei. The value at 0800 BT (Beijing time) represents the cumulative rainfall during 0700–0800 BT, the value at 1000 BT represent 0900–1000 BT, and so on. "DOWN" means the downwind area of urban

却出现一段降水低值;地表特征的改变引起的唐山 地区降水量的减少主要发生在午后 15:00~17:00、 夜晚 21:00~02:00 以及 06:00~08:00 (图 11c),其 他时段降水量的变化不大;城市地表特征对天津降 水的影响与北京和唐山有所不同,由图 11b 可见, 京津冀城市群的存在使天津地区的降水量在凌晨 02:00 至上午 09:00 明显增加,前面 4.3 节中也提到 地表特征的改变使天津城市区域 5~50 mm 等级的 降水量和降水频次有所增加(图 10a, b),这可能 是夜晚的热岛环流与海风环流的相互作用引起的。 与前面三个大城市相比,城市地表特征对石家庄降 水的影响并不明显(图 11d),在上午 10:00 至中午 13:00 时段 U09 的降水量比 NoUB 多,而凌晨 04:00 至早上 08:00 情况相反。由此可见,地表特征的改



图 12 U09 与 NoUB 模拟的 3 年夏季平均对流层垂直速度之差的日变化(单位: cm/s): (a) 北京; (b) 天津; (c) 唐山; (d) DOWN。纵坐标中 0~ 19 代表的 Eta 值分别为: 0.997、0.988、0.977、0.962、0.944、0.921、0.895、0.860、0.821、0.782、0.742、0.688、0.620、0.558、0.500、0.447、0.398、0.353、0.312、0.274

Fig. 12 Diurnal variation of the average difference in summer vertical velocity between ExptU09 and ExptNoUB in the troposphere for three years (units: cm/s): (a) Beijing; (b) Tianjin; (c) Tangshan; (d) DOWN. The corresponding Eta values for 0–19 on the *y*-axis are: 0.997, 0.988, 0.977, 0.962, 0.944, 0.921, 0.895, 0.860, 0.821, 0.782, 0.742, 0.688, 0.620, 0.558, 0.500, 0.447, 0.398, 0.353, 0.312, and 0.274. "DOWN" means the downwind area of urban

变对降水的影响因城市而异,但整体而言,城市下 垫面可能是京津冀城市区域降水减少的一个因素。 从图 11e 可以看出,城市下垫面使 DOWN 区域降 水的增加主要发生在白天,而午夜到次日凌晨,该 区域降水因地表特征的改变而减少。

#### 4.5 机理探究

由于城市化而引起的城区及周边地区降水的 变化很可能是由以下两个因素共同影响造成的(本 次模拟只考虑了地表特征的改变,没有考虑气溶胶 和人为热的变化):(1)地表粗糙度增加和城市热 效应引起的大气低层气流辐合加强;(2)城市区域 较少的水汽蒸发引发的边界层内水汽含量的减少。 低层气流辐合有利于垂直运动加强从而促进对流 的发展,而边界层内水汽含量的减少将使对流有效 位能(CAPE)减少进而抑制深对流的发展(Zhang et al., 2009)。对于京津冀地区,究竟是上述哪种因 素起主要作用?图12给出了U09与NoUB模拟的 四个区域对流层垂直速度和对流有效位能之差的 日变化分布图,横坐标为北京时间,纵坐标为垂直 层次。从北京、天津、唐山三个城市区域来看(图 12a、b和c),地表特征的改变使大部分时段对流层 低层的垂直运动加强,高层的垂直运动减弱,其中



图 13 同图 12,但为对流有效位能(CAPE)之差的日变化(单位: J/kg) Fig. 13 As in Fig. 12, but for the diurnal variation of the difference in convective available potential energy (units: J/kg)



图 14 U09 与 NoUB 模拟的夏季平均的地表潜热通量(单位: W/m<sup>2</sup>)之差的空间分布 Fig. 14 Spatial pattern of the difference in summer latent heat flux (units: W/m<sup>2</sup>) between ExptU09 and ExptNoUB

天津和唐山地区大气低层垂直运动的加强主要发 生在白天。通过图 12,我们发现城市地表特征对对 流层中高层垂直运动的抑制(加强)可能是引起降 水量减少(增加)的原因。例如,凌晨 02:00 至上 午 09:00 是天津城市区域对流层中高层垂直运动加 强的时段(图 12b),相应的该时段有城市试验(U09) 的降水量明显高于无城市试验(NoUB)的降水量 (图 11b);对于唐山地区(图 12c),对流层中高层 在午夜左右有一个较强的负值中心,对应时段 U09 的降水量也明显低于 NoUB (图 11c); 对于 DOWN 区域, 地表特征的改变使降水量的增加主要发生在 10:00~20:00 (图 11e), 而图 12d 中该时段的对流 层中高层则表现为一个较强的正值中心。由此可 见,城市地表特征对深对流的抑制(加强)可能是 造成京津冀地区降水减少(增多)的一个重要原因。 图 14 为 U09 与 NoUB 模拟的京津冀地区三年夏季 平均的潜热通量之差的空间分布。可以看出,城市 由于较少的水汽蒸发使得主要城市及周边地区潜 热通量明显减少,最大减少量达到了 200 W/m<sup>2</sup> 以 上,而城市群下风向潜热通量略有增加。城市区域 潜热通量的减少引起了大气低层水汽含量减少(图 略)进而使对流有效位能(CAPE)减少(图13a, b 和 c),这样,即使城市地区大气低层垂直运动由

于气流辐合而被加强, CAPE 的减少会在一定程度 上抑制垂直运动的进一步的发展进而使深对流的 发展被抑制,因此城市地表特征使主要城市区降水 减少。以上分析说明,对于京津冀城市群而言,蒸 发量的改变是引起降水变化的主要因素。Miao et al. (2011) 指出由于城市冠层模块(SLUCM)中并没 有将人为水汽排放源考虑进去,其模拟的空气湿度 可能会偏低,因此,上述结论存在一定局限性,未 来的工作需要进一步提高 UCM 模块对城市环境描 述的准确性从而提高模拟结果的可信度。虽然天津 地区凌晨 02:00 至上午 09:00 (图 12b) 以及 DOWN 地区上午 10:00~20:00 (图 12d) 是中高层垂直运 动增强、降水增加的时段,但 CAPE 在相应的时段 内并没有增加,反而有所减少,这说明城市地表特 征对降水的影响不仅由上述两种因素控制,还可能 与城市热岛环流引起的低层水汽输送的改变有关, 关于此还需要进一步的探讨。

# 5 结论

本文利用京津冀地区 24 个气象观测站的日降 水资料和耦合有单层城市冠层模式的中尺度模式 WRF 的模拟结果,研究了城市地表特征对京津冀地 区夏季降水的影响,主要的结论如下: (1)在京津冀城市面积迅速增长的近三十年 (1981~2010),该地区大部分站点的降水量都呈 现减少的趋势,减少最明显的站点主要集中在京津 唐城市区域。北京、密云和唐山站点降水量的减少 趋势均在-60 mm/10 a以上,天津宝坻和塘沽站点 的减少趋势也分别达到了-45.7 mm/10 a 和-34.1 mm/10 a,其中≥50 mm 等级降水量的减少趋势占 总降水量减少趋势的 50%以上,说明京津唐城市区 域降水量的减少很大程度上是由极端降水的减少 引起的。

(2)通过对比分析控制试验与敏感性试验的模 拟结果,发现城市化引起的地表特征的改变使北 京、天津、唐山主要城市地区的降水量和降水频次 明显减少,而城市群下风向的降水量和降水强度明 显增加和增强。其中 50 mm 以上等级的降水量变化 最为显著,贡献率在 60%以上,地表特征的改变使 北京、天津和唐山城市区域 50 mm 以上等级降水量 的百分比下降了 6%~20%,DOWN 区域增加了 8%。值得一提的是,城市地表特征仅使天津城市区 域 0~5 mm 的小降水事件和 50 mm 以上的极端降 水事件减少,而其他等级的降水明显增加,造成这 一结果的内在机理还需要进一步的探究。

(3)城市地表特征影响了主要城市和城市群下风向地区降水量的日变化结构:使北京和唐山城市 区域几乎所有时段降水量都有所减少;天津地区降 水量的减少发生在上午10:00 至凌晨01:00,而其他 时段降水量是增加的;城市群下风向降水量的增加 集中在白天,夜晚降水量减少。

(4)研究发现城市地表特征对深对流的抑制 (加强)可能是造成京津冀地区降水减少(增多) 的一个重要原因,而由于城市地表蒸发量的改变引 起的潜热通量和对流有效位能(CAPE)的改变则 可能是使深对流变化的重要因素。

#### 参考文献(References)

- Burian S J, Shepherd J M. 2005. Effect of urbanization on the diurnal rainfall pattern in Houston [J]. Hydrological Process, 19 (5): 1089–1103.
- Changnon S A Jr. 1968. The LaPorte weather anomaly—Fact or fiction? [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 49: 4–11.
- Changnon S A Jr. 1979. Rainfall changes in summer caused by St. Louis [J]. Science, 205 (4404): 402–404.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. Mon. Wea. Rev., 129: 569–585.

Chen F, Kusaka H, Tewari M, et al. 2004. Utilizing the coupled

WRF/LSM/Urban modeling system with detailed urban classification to simulate the urban heat island phenomena over the greater Houston area [C]//Fifth Conference on Urban Environment.

- Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. 2011. The integrated WRF/urban modelling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems [J]. International Journal of Climatology, 31: 273–288.
- Chen T C, Wang S Y, Yen M C. 2007. Enhancement of afternoon thunderstorm activity by urbanization in a valley: Taipei [J]. Appl. Meteor. Climatol., 46: 1324–1340.
- Chen X L, Zhao H M, Li P X, et al. 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes [J]. Remote Sens. Environ., 104: 133–146.
- Chow S D, Chang C. 1984. Shanghai urban influences on humidity and precipitation distribution [J]. GeoJournal, 8 (2): 201–204.
- Givati A, Rosenfeld D. 2004. Quantifying precipitation suppression due to air pollution [J]. J. Appl. Meteor., 43: 1038–1056.
- Guo X L, Fu D H, Wang J. 2005. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City [J]. Atmospheric Research, 82 (1–2): 112–126.
- He J, Liu J Y, Zhuang D F, et al. 2007. Assessing the effect of land use/land cover change on the change of urban heat island intensity [J]. Theor. Appl. Climatol., 90: 217–226.
- Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation [J]. Mon. Wea. Rev., 132: 103–120.
- Horton R E. 1921. Thunderstorm-breeding spots [J]. Mon. Wea. Rev., 49 (4): 193–193.
- Hu Y H, Jia G S. 2010. Influence of land use change on urban heat island derived from multi-sensor data [J]. Int. J. Climatol., 30: 1382–1395.
- Huang G, Liu Y, Huang R H. 2011. The interannual variability of summer rainfall in the arid and semiarid regions of northern China and its association with the northern hemisphere circumglobal teleconnection [J]. Adv. Atmos. Sci., 28 (2): 257–268.
- Huff F A, Changnon S A Jr. 1972. Climatological assessment of urban effects on precipitation at St. Louis [J]. J. Appl. Meteor., 11: 823–842.
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. J. Geophys. Res., 113, doi:10.1029/2008JD009944.
- Jauregui E, Romales E. 1996. Urban effects on convective precipitation in Mexico City [J]. Atmos. Environ., 30 (20): 3383–3389.
- Kain J S. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update [J]. J. Appl. Meteor., 43: 170–181.
- Kaufmann, Robert K, Karen C S. 2007. Climate response to rapid urban growth: Evidence of a human-induced precipitation deficit [J]. J. Climate, 20 (10): 2299–2306.
- 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 (1): 67–80.
- 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 Meteor, 101: 329–358.

Kusaka H, Chen F, Tewari M, et al. 2009. Performance of the WRF model as a high resolution regional climate model: Model inter-comparison study[C]//Proceedings of ICUC-7 (in CD-ROM).

- 李书严, 马京津. 2011. 城市化进程对北京地区降水的影响分析 [J]. 气 象科学, 31(4): 414–421. Li Shuyan, Ma Jingjin. 2011. Impact of urbanization on precipitation in Beijing area [J]. Journal of Meteorological Sciences (in Chinese), 31 (4): 414–421.
- 黎伟标, 杜尧东, 王国栋, 等. 2009. 基于卫星探测资料的珠江三角洲城市 群对降水影响的观测研究 [J]. 大气科学, 33 (6): 1259–1266. Li Weibiao, Du Yaodong, Wang Guodong, et al. 2009. Urbanization effects on precipitation over the Pearl River Delta based on satellite data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1259–1266.
- Li W B, Chen S, Chen G X, et al. 2011. Urbanization signatures in strong versus weak precipitation over the Pearl River Delta metropolitan regions of China [J]. Environ. Res. Lett., 6 (3), doi:10.1088/1748-9326/6/3/034020.
- Lin C Y, Chen F, Huang J C, et al. 2008. Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan [J]. Atmos. Environ., 42: 5635–5649.
- 骆三, 苗峻峰, 牛涛, 等. 2011. TRMM 测雨产品 3B42 与台站资料在中国区域的对比分析 [J]. 气象, 37 (9): 1081–1090. Luo San, Miao Junfeng, Niu Tao, et al. 2011. A comparison of TRMM 3B42 products with rain gauge observations in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37 (9): 1081–1090.
- 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 [J]. 热带气象学报, 26 (3): 273–282. Meng Weiguang, Zhang Yanxia, Li Jiangnan, et al. 2010. Application of WRF/UCM in the simulation of a heat wave event and urban heat island around Guangzhou City [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 26 (3): 273–282.
- 蒙伟光, 李昊睿, 张艳霞, 等. 2012. 珠三角城市环境对对流降水影响的模 拟研究 [J]. 大气科学, 36 (5): 1063–1076. Meng Weiguang, Li Haorui, Zhang Yanxia, et al. 2012. A modeling study of the impacts of Pearl River Delta urban environment on convective precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 1063–1076.
- Miao S G, Chen F. 2008. Formation of horizontal convective rolls in urban areas [J]. Atmospheric Research, 89 (3): 298–304.
- Miao S G, Chen F, Le M A, et al. 2009. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 48: 484–501.
- Miao S G, Chen F, Li Q C, et al. 2010. Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: A case study of heavy rainfall in Beijing on 1 August 2006 [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50: 806–825.
- Niyogi D, Pyle P, Lei M, et al. 2011. Urban modification of thunderstorms: An observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50: 1129–1144, doi:10.1175/2010JAMC1836.1.
- Noh Y, Cheon W G, Hong S Y, et al. 2003. Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data [J]. Bound.-Layer Meteor., 107: 401–427.
- Oke T R. 1982. The energetic basis of the urban heat island [J]. Quart. J.

Roy. Meteor. Soc., 108 (455): 1-24.

- 钱嘉星, 徐海明, 万齐林. 2010. 珠江三角洲城市群对雷暴的影响 [J]. 热带气象学报, 26 (1): 40–48. Qian Jiaxing, Xu Haiming, Wan Qilin. 2010. The effects on thunderstorms of the urbanized city group of Pearl River Delta [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 26 (1): 40–48.
- Rosenfeld D, Dai J, Yu X, et al. 2007. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation [J]. Science, 315: 1396–1398.
- Shepeherd J M, Burian S. 2003. Detection of urban-induced rainfall anomalies in a major coastal city [J]. Earth Interactions, 7 (4): 1–17.
- Shepherd J M, Carter W M, Manyin M, et al. 2010. The impact of urbanization on current and future coastal precipitation: A case study for Houston [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 37: 284–304.
- Wan H C, Zhong Z, Yang X Q, et al. 2013. Impact of city belt in Yangtze River Delta in China on a precipitation process in summer: A case study [J]. Atmospheric Research, 125-126: 63–75.
- Wang J, Feng J M, Yan Z W, et al. 2012. Nested high-resolution modeling of the impact of urbanization on regional climate in three vast urban agglomerations in China [J]. J. Geophys. Res., 117: D21103, doi:10.1029/2012JD018226.
- 吴风波,汤剑平. 2011. 城市化对 2008 年 8 月 25 日上海一次特大暴雨的 影响 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 47 (1): 71-81. Wu Fengbo, Tang Jianping. 2011. The impact of urbanization on a heavy rainfall case in Shanghai on 25 August 2008 [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 47 (1): 71-81.
- Yang L, Tian F Q, Smith J, et al. 2014. Urban signatures in the spatial clustering of summer heavy rainfall events over the Beijing metropolitan region [J]. Journal of Geophysical Research-Atmosphere, 119 (3): 1203–1217, doi:10.1002/2013JD020762.
- 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 [J]. 地球物理学报, 50 (5): 1373–1382. Zhang C L, Miao S G, Li Q C, et al. 2007. Impacts of fine-resolution land use information of Beijing on a summer severe rainfall simulation [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 50 (5): 1373–1382.
- Zhang C L, Chen F, Miao S G, et al. 2009. Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing metropolitan area [J]. J. Geophys. Res., 114: D02116, doi:10.1029/2008JD010328.
- 张健,章新平,王晓云,等. 2010. 近47年来京津冀地区降水的变化 [J]. 干旱区资源与环境, 24 (2): 74-80. Zhang Jian, Zhang Xinping, Wang Xiaoyun, et al. 2010. Precipitation change in Beijing-Tianjin-Hebei Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 24 (2): 74-80.
- 张艳霞,蒙伟光,戴光丰,等. 2013. WRF 耦合城市冠层模式对珠三角城 市群天气模拟影响的评估 [J]. 热带气象学报, 29 (6): 935–946. Zhang Yanxia, Meng Weiguang, Dai Guangfeng, et al. 2013. Investigating the use of WRF urban canopy models in weather simulation over Pearl River Delta metropolitan area [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 29 (6): 935–946.
- 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 [J]. 气象, 39 (3): 340–346. Zheng Zuofang, Gao Hua, Li Qingchun. 2013. Numerical simulation for the urbanization effects on an extreme rainfall in Beijing [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 39 (3): 340–346.