

Journal of the Meteorological Sciences ISSN 1009-0827,CN 32-1243/P

# 《气象科学》网络首发论文

气象科学

 

 题目:
 城市水文过程对气象环境影响的模拟分析

 作者:
 李立,刘寿东,王咏薇,任侠,王恪非

 收稿日期:
 2017-11-14

 网络首发日期:
 2019-05-27

 引用格式:
 李立,刘寿东,王咏薇,任侠,王恪非.城市水文过程对气象环境影响的模 拟分析[J/OL].气象科学.

http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1243.P.20190527.0853.002.html



# Service Servi

网络首发:在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶 段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期 刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出 版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出 版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编 辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、 出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。 为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认:纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国 学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷 出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出 版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首 发论文视为正式出版。

第39卷 第2期	气象科学	Vol. 39, No.2
2019年4月	Journal of the Meteorological Sciences	Apr., 2019

李立,刘寿东,王咏薇,等.城市水文过程对气象环境影响的模拟分析.气象科学,2019,39(2):247-255.

LI Li, LIU Shoudong, WANG Yongwei, et al.Simulation analysis of urban hydrological process effect on meteorological environment. Journal of the Meteorological Sciences, 2019,39(2):247-255.

# 城市水文过程对气象环境影响的模拟分析

李立<sup>1,2</sup> 刘寿东<sup>1,2</sup> 王咏薇<sup>1,2,3</sup> 任侠<sup>1,2,3</sup> 王恪非<sup>1,2,3</sup>

(1南京信息工程大学 气候与环境变化国际合作联合实验室/大气环境中心,南京 210044; 2南京信息工程大学 气象灾害预报预警与 评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室,南京 210044; 3南京信息工程大学 大气物理学院,南京 210044)

摘要 采用引入城市水文过程的 WRF/SLUCM 方案,以北京 2010 年 7 月 4—6 日高温热浪天 气为背景,模拟了绿地灌溉、绿洲效应和人为潜热等水文过程可导致北京城区 13:00(7 月 4—6 日小时平均,下 同) 潜热通量升高最多约 100 W·m<sup>-2</sup>,02:00 升高最多约 15 W·m<sup>-2</sup>;感热通量 13:00 降低最多约 80 W·m<sup>-2</sup>;02:00 降低最多约 5 W·m<sup>-2</sup>。(2)城市水文过程可导致城区 13:00 相对湿度增加最多约 4%,02:00 约 6%;地表气温 13:00 降低最多约 1.2 ℃,02:00 约 0.4 ℃。(3)城市水文过程对北京城市热岛强度的减弱效果白天明显好于夜间,且在 10:00—14:00 出现了强度约 0.8 ℃的冷岛效应。(4) 水文过程会导致北京城区 500 m 高度以下白天大气温度最多降低 0.5 ℃,相对湿度最多增加 3%,但夜间影响较小。由于热对流运动的减弱,城区边界层高度降低约 200 m;城区 1 km 高度以上水平风速增大,低层风速减小。

**关键词** WRF/SLUCM 方案;城市水文过程;气象要素;边界层结构 分类号:X16 doi:10.3969/2018jms.0020 文献标识码:A

# Simulation analysis of urban hydrological process effect on meteorological environment

LI Li<sup>1, 2</sup> LIU Shoudong<sup>1, 2</sup> WANG Yongwei<sup>1, 2, 3</sup> REN Xia<sup>1, 2, 3</sup> WANG Keifei<sup>1, 2, 3</sup>

(1 Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, International Joint Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEC), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education(KLME)/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters(CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3 College of Atmospheric Physics, Nanjing University of

University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract** This paper simulates the effect of urban hydrological processes such as green irrigation, oasis effect and artificial latent heat in Beijing on the urban meteorological environment, using the WRF/ SLUCM scheme during a lasting heat wave on July 4-6, 2010. The results are shown as follows. (1) The model can improve the latent heat flux up to 100W m<sup>-2</sup> at 13:00, and 15W m<sup>-2</sup> at 02:00, and the sensible heat flux decreases up to 80W m<sup>-2</sup> at 13:00, and 5 W m<sup>-2</sup> at 02:00. (2) The model can improve the relative humidity up to 4% at 13:00, and 6% at 02:00, and the surface temperature drops 1.2°C at most at 13:00, and 0.4°C at 02:00. (3) The weakening effect of urban hydrological process on

收稿日期(Received):2017-11-14;修改稿日期(Revised):2018-01-19; 网络出版日期(Published on-line): 网络出版地址:

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41675016);教育部长江学者和创新团队发展计划项目(PCSIRT);江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD);中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室开放课题(LAPC-KF-2018-09)

通信作者(Corresponding author):王咏薇(WANG Yongwei).wyw@nuist.edu.cn

the urban heat island in Beijing is significantly weaker during the day than at night, and a cold island effect with an intensity value of  $0.8^{\circ}$  occurred at 10:00-14:00. (4) The urban hydrological processes cause the air temperature decreases by  $0.5^{\circ}$  at most and the relative humidity increases by  $3^{\circ}$  below 500m during the day in urban areas. Due to poor thermal convective motion, the boundary layer height decreases at about 200m; the wind speed increases above 1 km, while the wind speed reduces in the lower layer.

Key words WRF/SLUCM; urban hydrological processes; meteorological elements; boundary layer structure

# 引 言

随着我国经济的飞速发展,城市人口占社会总 人口比重上升,城市用地规模不断扩大。城市化进 程直接影响到城市中水文过程的变化[1],一方面城 市高强度经济活动中产生的人为潜热影响着城区 的能量和水分平衡,这些人为潜热来自于空调制冷 和化工燃料燃烧过程以及汽车尾气的排放,空调制 冷和化工燃料燃烧使得水汽发生相变转化为人为 潜热,汽车尾气则直接排出的人为水汽;另一方面 城区自然下垫面被密集的建筑物和道路等不透水 下垫面所取代[2-5],城区植被在这样不透水下垫面 情况下,蒸散较之在自然下垫面中增强,称为绿洲 效应<sup>[6]</sup>,并且人为地对城区植被进行灌溉也增加着 水汽的排放。可见,城市水文过程的变化将对天 气、气候、大气环境以及城市生态系统产生显著影 响[7-9],因此,准确模拟水文过程对城市气象环境的 影响,对提高天气气候预测的准确性意义重大。

为了对城市中的各种水文过程进行准确模拟, 需要采用适合城市下垫面特征的城市陆面模式。 而目前城市冠层方案中缺乏对城市水文过程进行 合理参数化的模型,所以难以准确地描述城市中水 汽平衡和潜热通量的动态变化。Grimmond, et al<sup>[10-11]</sup>比较了全球 33 个不同类型城市冠层方案的 模拟性能,发现这些方案在模拟地表潜热通量时均 出现了低估,感热通量出现了高估;苗世光等<sup>[12]</sup>研 究指出,由于城市地表潜热通量的低估,导致地表 温度升高,垂直运动增强,边界层升高,这些都直接 影响着城区地表气象要素变化和边界层结构。因 此,目前城市冠层方案中需要解决的问题是将城市 地气交换方案进行合理的参数化,建立城市水文过 程模型[13-14]。近年来,不同学者针对绿色屋顶(城 市水文过程)对城市热岛效应减缓的程度和范围进 行了研究。LI, et al<sup>[15]</sup>采用 WRF/PUCM 方案模拟 了巴尔的摩-华盛顿都市地区绿色屋顶的降温效 应,发现绿色屋顶能有效降低城区的热岛强度,并 且随着屋顶中绿色屋顶占比的增加,热岛强度随之 线性降低;SUN, et al<sup>[16]</sup>应用 WRF/PUCM 模拟了北 京一次高温热浪过程,结果表明绿色屋顶能抑制边 界层顶的热量通过夹卷作用进入地表,并且通过改 变局地对流机制来减少高温热浪下的热对流。为 了对城市中各种水文过程进行模拟,YANG, et al<sup>[17]</sup> 改进了 WRF/SLUCM 方案,引入城市绿化灌溉、绿 洲效应、人为潜热、不透水地面蒸发和绿色屋顶等 水文过程,取得了较好效果。但国内各种城市水文 过程对城市气象条件影响的系统研究较少。

近年来,北京城市化进程不断加快,城区面积 日益增长,植被覆盖和不透水面的空间格局发生了 显著改变<sup>[18-19]</sup>,城市中机动车数量和空调使用量也 在持续增加,不断影响着城市中的水文过程。本项 研究基于 WRF 模型,采用 YANG, et al<sup>[17]</sup>改进的城 市冠层方案,探讨了绿地灌溉、绿洲效应和人为潜 热等城市水文过程对北京城区气象环境的影响。

# 1 研究方法

### 1.1 观测方法

气象资料来自北京市 72 个城区自动气象站中 未出现缺测的 43 个站点的 2 m 温度、2 m 相对湿度 和 10 m 风速观测数据。通量资料为北京 325 m 铁 塔 140 m 高度处的感热、潜热通量数据,该数据由湍 流通量观测系统得到的观测数据通过涡动相关法 计算得到。采用历史极值法、观测数据连续性原理 对观测数据进行野点剔除及质量控制。

#### 1.2 模拟方法

WRF 模式是由美国环境预报中心 NCAR、美国 国家大气研究中心 NOAA 等联合开发的新一代中 尺度数值天气预报模式<sup>[13]</sup>。研究选用 WRFV3.8 版 本,其中的 SLUCM 方案<sup>[20-21]</sup>引入了 YANG, et al<sup>[17]</sup> 改进的城市水文过程计算,对 Noah-SLUCM 中地表 潜热通量模拟方法进行了改进<sup>[15]</sup>。SLUCM 方案 中,城市地表能量平衡方程为:

人为排放潜热包括汽车尾气排放、空调系统制 冷以及化工燃料燃烧等潜热排放,计算公式为:

$$Q_{\rm ALH} = Q_{\rm ALHmax} \times f_{\rm ALH} , \qquad (2)$$

式中:Q<sub>ALHmax</sub>是人为排放潜热最大值,随季节变化; f<sub>ALH</sub>是人为排放潜热的日变化系数。根据北京城市 居民生活规律的人为排放潜热日变化系数,计算得 到夏季人为潜热日排放曲线如图 1<sup>[12]</sup>,可见夏季最 大值出现在 16:30 为 42 W·m<sup>-2</sup>,即Q<sub>ALHmax</sub>取值为 42 W·m<sup>-2</sup>。



图 1 人为排放潜热日变化 Fig.1 The diurnal variation of the anthropogenic latent heat flux

潜热通量计算公式为:

 $LE = (LE_{veg} \times \alpha_{oasis}) \times (1 - f_{urb}) + LE_{urb} \times f_{urb} \circ (3)$ 式中:  $LE_{urb}$  为城市不透水下垫面潜热通量;  $f_{urb}$  为城 建部分占比;  $LE_{veg}$  为城市自然下垫面潜热通量;  $\alpha_{oasis}$ 为绿洲效应系数, 城市自然下垫面潜热通量主要考 虑了城市绿地人为灌溉增加蒸散的潜热以及绿洲 效应增加蒸散的潜热。本项研究中, 设定灌溉的 时间为6—9月每天21:00—22:00, 灌溉后使0~1 m



土壤(Noah 陆面模式的 1~3 层)达到田间持水量, 绿洲效应系数夏季取 1.5<sup>[12]</sup>。根据文献调研得到 2010 年北京城区绿地覆盖率为 0.217<sup>[17]</sup>。

## 1.3 试验方案设计

北京 2010 年夏季 7 月 4—6 日高温热浪期间, 中国北方受到持续亚热带高压控制,7 月 5 日北京 城市站点 A1020 观测到的最高气温达到 42.6 ℃, 期间北京地区主导风向为南风<sup>[22]</sup>。

数值模拟采用 WRFV3.8,模拟区域采用双向反 馈的三重嵌套(图 1a),三重嵌套网格距分别为 9 km、3 km、1 km,水平网格距分别为 100×95、136× 121、151×36,模拟中心位置为(40.405°N, 116.326°E),北京主城区及周边郊区均包含在内。 模拟区域的地形高度及下垫面类型分布见图 2b,图 中黑色实心圆点为自动气象站,黄色实心圆点为 325 m 铁塔位置。

模式垂直分为53 层,顶层气压50 hPa,模拟所 用地形资料为 MODIS 的 30 s 格点资料。采用 NCEP/NCAR 逐日4次1°×1°的 FNL资料作为初始 场和边界场,逐时输出模拟结果。根据城市水文过 程不同设计了4个算例及其数值试验参数化方案 (表1)。

# 2 模拟验证

图 3 是用观测值对气象要素及地表能量平衡进行的模拟验证,其中 2 m 气温、2 m 相对湿度、10 m 风速、潜热通量、感热通量观测值与模拟值之间的 相关系数分别为 0.87、0.89、0.24、0.79 和 0.85,模 拟均方根误差为 0.003 ℃、5.41%、0.91 m · s<sup>-1</sup>、 53.19 W·m<sup>-2</sup>和 51.49 W·m<sup>-2</sup>。可见模拟结果能够



图 2 WRF 模拟区域:(a) 地形高度;(b) 最内层下垫面类型 Fig.2 WRF simulation area: (a) terrain height; (b) innermost underlying surface type

	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
表 1	算例设计及数值试验参数化方案

Table	Example design and numerical experiment parametric scheme		
	NO 算例	不考虑任何城市水文过程	
算例	IR 算例	只考虑绿地灌溉、绿洲效应	
介绍	ALH 算例	只考虑人为潜热	
	ALHIR 算例	绿地灌溉、绿洲效应、人为潜热一起考虑	
参数化 方案	微物理过程	WSM3-class simple ice scheme	
	长波辐射方案	rrtm scheme	
	短波辐射方案	Dudhia scheme	
	近地面层方案	Eta similarity	
	陆面过程	unified Noah land-surface model	
	边界层方案	Mellor-Yamada-Janjic scheme	
	城市物理方案	Single-layer UCM	
	ZR	18.3 m	
	ROOF_WIDTH	10 m	
	ROAD_WIDTH	10 m	
城市	FRC_URB	0. 783	
冠层	CAPR/CAPB/CAPG	2. 0E6 /1. 2E6/ 1. 4E6 $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$	
参数	AKSR/AKSB/AKSG	1. $2/1.2/1.5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$	
	ALBR/ALBB/ALBG	0. 2 /0. 2/ 0. 2	
	EPSR/EPSB/EPSG	0. 88 0. 88 0. 88	
	AH	$120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	

注:ZR 为建筑物高度;FRC\_URB 为城市地表不透水面积百分比;CAPR/CAPB/CAPG 为屋顶/路面/墙面热容量;AKSR/ AKSB/AKSG 为屋顶/路面/墙面热传导系数;ALBR/ALBB/ALBG 为屋顶/路面/墙面反照率;EPSR/EPSB/EPSG 为屋顶/路面/墙 面发射率;AH 是人为热.

较好地反映2m气温、2m相对湿度、潜热通量和感 热通量的日变化趋势,模拟误差也较小;而10m风 速模拟误差较大是由于 SLUCM 方案对冠层内部建 筑物外形特征描述过于简单,人为降低了城市下垫 面的粗糙度,导致了 SLUCM 方案在模式第一层高 度风速计算时出现高估<sup>[24-25]</sup>。

## 3 结果与分析

#### 3.1 城市水文过程对地表能量分配的影响

城市水文过程首先改变了地表能量平衡。2010 年 7 月 4—6 日 NO、ALH、IR、ALHIR 4 个算例的潜 热通量、感热通量模拟值对比见图 4。

从图 4 中可以看出,4 个算例的潜热通量、感热 通量模拟值变化趋势基本一致。但从峰值上分析, 图 3d 中,6 日气温较高的 13:00(北京时,下同)潜 热通量观测的最大值为 174 W・m<sup>-2</sup>,此时图 4a 中 NO 算例的模拟结果低于观测值为 95 W・m<sup>-2</sup>, ALH、IR 以及 ALHIR 算例的模拟结果分别为 120、 164 和 185 W・m<sup>-2</sup>,以 IR、ALHIR 算例模拟值与观 测值最为接近。另外,不同的水文过程对感热通量 也有较大影响,图 3e 中,6 日气温较高的 13:00 的 感热通量最大值为 216 W·m<sup>-2</sup>,此时图 4b 中 NO、 ALH、IR 和 ALHIR 算例的模拟结果分别为 280、 280、201 和 201 W·m<sup>-2</sup>,可见 IR、ALHIR 算例模拟 值与观测最为接近。

从图 4b 中还可以看出,NO 算例(不考虑任何 城市水文过程)与 ALH 算例(只考虑人为潜热)模 拟的感热通量曲线基本重合,而 IR 算例(只考虑绿 地灌溉、绿洲效应)与 ALHIR 算例(绿地灌溉、绿洲 效应、人为潜热一起考虑)模拟的感热通量曲线基 本重合,出现这个现象的原因可能是人为潜热对感 热通量的影响较小,而 NO 算例和 IR 算例模拟的感 热通量曲线存在差异,说明灌溉会引起感热通量的 变化;4 个算例模拟的潜热通量曲线存在较大差异, 说明人为潜热和灌溉都会影响到潜热通量的变化。 4 个算例总体比较,ALHIR 算例潜热通量、感热通量 的模拟效果最好。

接下来具体分析 ALHIR 算例与 NO 算例在地 表能量分配上的差异。加入绿地灌溉、绿洲效应和 人为潜热等城市水文过程的 ALHIR 算例与不考虑 任何城市水文过程的 NO 算例模拟的 7 月 4-6 日 13:00、02:00 潜热通量、感热通量差值见图 5。图 5a、b中,绿地灌溉、绿洲效应和人为潜热等水文过 程可导致城区(黑色实线内,下同)潜热通量呈升高 趋势,气温较高的13:00城区潜热通量升高最多可 达 100 W · m<sup>-2</sup>,02:00 升高最多约 15 W · m<sup>-2</sup>。导致 白天潜热通量明显升高的原因是夜间绿地灌溉以 后土壤含水量增加,而随着白天气温升高,绿地蒸 散加强,地表潜热通量明显升高;夜间潜热通量的 差值主要受人为潜热的影响,从图 2 中可以看出 02:00的人为潜热为14 W·m<sup>-2</sup>,刚好是夜间潜热通 量的增加量。图 5c、d 显示,绿地灌溉、绿洲效应和 人为潜热等城市水文过程使得城区白天感热通量 呈现明显降低趋势,13:00 城区感热通量降低最多 约80 W·m<sup>-2</sup>;而02:00 降低最多约5 W·m<sup>-2</sup>。城 区感热通量的降低主要与灌溉有关,受人为潜热影 响较小。灌溉主要使白天潜热通量升高,导致白天 感热通量降低;而灌溉在夜间影响较小,感热通量 变化也较小。

### 3.2 城市水文过程对地表气象场的影响

ALHIR 与 NO 算例模拟的 7 月 4—6 日 13:00、 02:00 的地表气温和相对湿度差值见图 6。图 6a、b 显示,绿地灌溉、绿洲效应和人为潜热等水文过程 可导致城区相对湿度呈现增加趋势,13:00 城区相



图 3 7月 4—6 日模拟值与观测值的对比:(a)2 m 气温;(b)2 m 相对湿度;(c)10 m 风速;(d)潜热通量;(e)感热通量 Fig.3 The comparison between simulations and obserbations during 4—6 of July: (a)2 m temperature;(b) 2 m relative humidity; (c) 10 m wind speed; (d) latent heat flux;(e) sensible heat flux



图 4 7月 4—6日四个算例的对比:(a)潜热通量;(b)感热通量 Fig.4 The comparision of four cases during 4—6 of July: (a)latent heat flux;(b) sensible heat flux

(a) (b) 40°15 40°00 39°45 39°30′ -90 -60 -30 0 30 60 90 W·m<sup>-2</sup> 40°30' N à  $(\mathbf{d})$ 40°15′ 40°00 39°45 39°30′ 116  $116^{\circ}40' E$ 116°40'E 116 -80-60-40-20 0 20 40 60 80 W·m<sup>-2</sup>

图 5 7月4—6日 ALHIR 算例与 NO 算例的差值:(a)13:00 潜热通量;(b)02:00 潜热通量;(c)13:00 感热通量;(d)02:00 感热通量 Fig.5 The difference between the case of ALHIR and the case of NO during 4—6 of July: (a) latent heat flux at 13:00 BST; (b) latent heat flux at 02:00 BST; (c) sensible heat flux at 13:00 BST; (d) sensible heat flux at 02:00 BST

对湿度增加最大可达 4%,02:00 可达 6%。13:00 相对湿度增加可能与此时潜热通量升高有关;而 02 :00 相对湿度增加更多,不仅受到白天相对湿度升 高影响,还与夜间的低温有关。从图 6c、d 中可以看 出,绿地灌溉、绿洲效应和人为潜热等水文过程可 导致城区地表气温呈现降低趋势,13:00 城区 2 m 气温升高最大达到 1.2 ℃,02:00 为 0.4 ℃,这与感 热通量降低有关。

#### 3.3 城市水文过程对热岛强度的影响

在进行热岛强度计算时,将北京西部、北部及 东北部的山区部分排除在外,用城市下垫面和农田 下垫面来分别代表城市和郊区<sup>[25]</sup>。7月4—6日 ALHIR 算例与 NO 算例模拟的北京城市热岛强度的 小时平均日变化见图 7。

从图 7 中可以看出,绿地灌溉、绿洲效应和人为 潜热等城市水文过程对城市热岛强度的减弱效果 白天比较明显,夜间较差。NO 算例全天处于热岛 效应下,而 ALHIR 算例在 10:00—14:00 出现了强 度约 0.8 ℃的冷岛效应,可能原因是此时段气温较 高,灌溉后绿地蒸散增强吸收了更多的热量,使得 城区气温降低<sup>[26-27]</sup>。

#### 3.4 城市水文过程对垂直气象场的影响

绿地灌溉、绿洲效应和人为潜热等城市水文过程,不仅对地表气象要素产生影响,还会引起垂直 气象场和边界层高度的改变。地面大气状况不仅 受到近地层热量的影响,在高温热浪条件下,边界 层顶的夹卷作用也影响着地面大气状况。Miralles, et al<sup>[28]</sup>研究发现,在高温热浪期间,水汽不足以及 强夹卷作用增强了热应力,边界层高度升高。

图 8 显示了 ALHIR 算例与 NO 算例模拟的 7 月 4—6 日北京城区垂直方向上气温、相对湿度和水平 风速差值的小时平均日变化,图中黑色、蓝色曲线分 别为 ALHIR、NO 算例模拟得到的边界层高度日 变化。

从图 8a、b 中可以看出,白天在 500 m 高度以下,ALHIR 与 NO 算例模拟的城区气温的最大差值 为-0.5℃,相对湿度最大差值为 3%,但在夜间两者 差值较小。由于夹卷携带的热量和边界层高度主

40°30′ N



图 6 7月4—6日 ALHIR 算例与 NO 算例的差值(2 m);(a)13:00 相对湿度;(b)02:00 相对湿度;(c)13:00 气温;(d)02:00 气温 Fig.6 The difference between the case of ALHIR and the case of NO during 4—6 of July(a) relative humidity at 13:00; (b) relative humidity at 02:00 BST; (c) temperature at 13:00 BST; (d) temperature at 02:00 BST





要受地表热量的控制<sup>[29-31]</sup>,而绿地灌溉、绿洲效应 和人为潜热等水文过程会导致城区地表温度的降 低和相对湿度的增加,从而15:00—17:00边界层高 度降低约200 m。从图8c中可以看出,同样由于城 区气温降低,在城市大气1 km高度以内,垂直热对 流运动的减弱引起水平风速减小,1 km高度以上水 平风速增加,且城区上方具有较大风速的高层大气 较少流入具有较小风速的低层大气,从而使得低层



图 8 7月4—6日 ALHIR 与 NO 算例城区垂直差值日变化:(a)气温;(b)相对湿度;(c)水平风速 Fig.8 Diurnal variation of the vertical difference of 3-day average between the case of ALHIR and the case of NO: (a) temperature; (b) relative humidity; (c) horizontal wind speed

风速更小,高层风速更大。

## 4 结论

(1)模拟结果进行验证发现 2 m 气温、2 m 相对 湿度、10 m 风速、潜热通量、感热通量观测值与模拟 值之间的相关系数分别为 0.87、0.89、0.24、0.79 和 0.85,均方根误差分别为 0.003 ℃、5.41%、0.91 m・s<sup>-1</sup>、53.19 W・m<sup>-2</sup>和 51.49 W・m<sup>-2</sup>,2 m 气温、 2 m 相对湿度、潜热通量、感热通量的模拟效果较 好,10 m 风速模拟误差较大。

(2)城市水文过程会对地表能量分配产生明显 影响。加入不同城市水文过程的四个算例进行比 较发现,潜热通量、感热通量模拟效果以ALHIR 算 例(绿地灌溉、绿洲效应和人为潜热一起考虑)最 好;绿地灌溉、绿洲效应和人为潜热一起考虑)最 好;绿地灌溉、绿洲效应和人为潜热等水文过程可 导致城区潜热通量呈升高趋势,13:00(7月4-6日 小时平均,下同)城区潜热通量升高最多可达100 W·m<sup>-2</sup>,主要受到绿地灌溉的影响;02:00升高最 多约15 W·m<sup>-2</sup>,主要是夜间人为潜热较低所致。 城区白天感热通量呈现明显降低趋势,13:00 城区 感热通量降低最多约80 W·m<sup>-2</sup>;而02:00 降低最 多约5 W·m<sup>-2</sup>,感热通量降低主要与灌溉有关。

(3)城市水文过程会对地面气象要素产生明显 影响。绿地灌溉、绿洲效应和人为潜热等水文过程 可导致城区相对湿度呈现增加趋势,13:00城区相 对湿度增加最大可达4%,02:00可达6%,相对湿度 增加主要与白天潜热通量升高、夜间气温降低有 关;城区地表气温呈现降低趋势,13:00城区2m气 温降低最大达1.2℃,02:00为0.4℃,主要与感热 通量降低有关。

(4)绿地灌溉、绿洲效应和人为潜热等城市水 文过程对城市热岛强度的减弱效果白天明显好于 夜间,且在10:00—14:00 出现了强度约0.8℃的冷 岛效应。

(5)绿地灌溉、绿洲效应和人为潜热等水文过 程会导致城区地表温度的降低和相对湿度的增加。 白天在 500 m 高度以下城区气温最多降低 0.5 ℃, 相对湿度最多增加 3%,但夜间影响较小。由于热 对流运动的减弱,城区边界层高度降低约 200 m;城 区 1 km 高度以上水平风速增大,低层风速减小。

本项研究模拟时间短,范围小,未来需要对更 大范围、更长时间、更多天气背景来评估加入城市 水文过程的模拟效果。并且采用的 SLUCM 方案只 是简单地将"人为潜热"作为额外的潜热加入到模 式当中,仅可以描述"人为潜热"的日变化特征,不能描述"人为潜热"与边界层能量平衡之间的反馈 作用,会使模拟结果带来误差。

**致谢:**衷心感谢北京城市气象研究所/中国科学院 大气物理研究所提供的数据支持。

#### 参考文献

- Fernando H J S. Fluid dynamics of urban atmospheres in complex terrain. Ann Rev Fluid Mechan, 2010, 42(1): 365-389.
- [2] 王咏薇,任侠,翟雪飞,等.南京复杂下垫面条件下的三维城 市热环境模拟.大气科学学报,2016,39(4):525-535.
   WANG Yongwei, REN Xia, ZHAI Xuefei, et al. Numerical study of the three-dimensional thermal environment over a complex underlying surface in Nanjing. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2016, 39(4): 525-535.
- [3] ZHANG Chaolin, CHEN Fei, MIAO Shiguang, et al. Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing metropolitan area. J. Geophys. Res. Atmos., 2009, 114(D2), D02116.
- [4] 王咏薇,蒋维楣,郭文利,等. 城市布局规模与大气环境影响的数值研究. 地球物理学报,2008,51(1):88-100.
   WANG Yongwei, JIANG Weimei, GUO Wenli, et al. Numerical study of the urban scale and layout effect on atmospheric environment. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 2008, 51(1):88-100.
- [5] 周荣卫,蒋维楣,何晓凤.城市冠层模式对城市气温模拟的改进.南京大学学报(自然科学版)(in Chinese),2008,44(3): 250-257.

ZHOU Rongwei, JIANG Weimei, HE Xiaofeng. Improvement of urban canopy model on urban air temperature simulation. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 2008, 44(3): 250-257.

- [6] Hagishima A, Narita K I, Tanimoto J. Field experiment on transpiration from isolated urban plants. Hydrological Processes, 2007, 21(9): 1217-1222.
- [7] 蒋维楣,王咏薇,张宁.城市陆面过程与边界层结构研究.地 球科学进展,2009,24(4):411-419.
   JIANG Weimei, WANG Yongwei, ZHANG Ning. Research on urban land-surface process and boundary layer structure. Advances in Earth Science(in Chinese), 2009, 24(4):411-419.
- [8] 王雪梅,陈燕,蒋维楣,等.珠江三角洲城市尺度规划对大气 环境的影响效应.中山大学学报(自然科学版),2009,48
  (6):115-120.
  WANG Xuemei, CHEN Yan, JIANG Weimei, et al. Impacts of urban planning on atmospheric environment over the pearl river delta region. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese), 2009, 48(6): 115-120.
- [9] 蒋维楣, 苗世光, 张宁, 等. 城市气象与边界层数值模拟研究. 地球科学进展, 2010, 25(5): 463-473.
  JIANG Weimei, MIAO Shiguang, ZHANG Ning, et al. Numerical simulation on urban meteorology and urban boundary layer. Advances in Earth Science (in Chinese), 2010, 25(5):

463-473.

- [10] Grimmond C S B, Blackett M, Best M J, et al. The international urban energy balance models comparison project: first results from phase 1. J. Appl. Meteor. Climatol., 2010, 49(6): 1268-1292.
- [11] Grimmond C S B, Blackett M, Best M J, et al. Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. Int. J. Climatol., 2011, 31(2): 244-272.
- [12] 苗世光, CHEN Fei. 城市地表潜热通量数值模拟方法研究.中国科学(地球科学), 2014, 44(5): 1017-1025.
  MIAO Shiguang, CHEN Fei. Enhanced modeling of latent heat flux from urban surfaces in the Noah/single-layer urban canopy coupled model. Science China: Earth Sciences, 2014, 57(10): 2408-2416.
- [13] Hamdi R, Termonia P, Baguis P. Effects of urbanization and climate change on surface runoff of the Brussels Capital Region: a case study using an urban soil-vegetation-atmosphere-transfer model. Int. J. Climatol., 2011, 31(13): 1959-1974.
- [14] Flagg D D, Taylor P A. Sensitivity of mesoscale model urban boundary layer meteorology to the scale of urban representation. Atmos. Chem. Phys., 2011, 11(6): 2951-2972.
- [15] LI Dan, BouZeid E, Oppenheimer M. The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. Environ. Res. Lett, 2014, 9(5): 055002.
- [16] SUN Ting, Grimmond CSB, NI Guangheng. How do green roofs mitigate urban thermal stress under heat waves?. J. Geophys. Res. Atmos., 2016, 121(10): 5320-5335.
- [17] YANG Jiahua, WANG Zhihua, CHEN Fei, et al. Erratum to: Enhancing hydrologic modelling in the coupled weather research and forecasting-urban modelling system. Boundary-Layer Meteor, 2015, 155(2): 369-369.
- [18] 张小华,高志球,宋玉芝,等.北京郊区草地夏季能量收支平衡的数值模拟.大气科学学报,2015,38(6):827-835.
  ZHANG Xiaohua, GAO Zhiqiu, SONG Yuzhi, et al. Numerical simulation of surface energy budget balance over grassland in Beijing suburban area in summer. Transactions of Atmospheric Scienes(in Chinese), 2015, 38(6): 827-835.
- [19] 缪丽娟,崔雪锋,栾一博,等.北京上海近 20 a 城市化过程中 土地利用变化异同点探析. 气象科学, 2011, 31(4): 398-404.
  MIAOLijuan, CUI Xuefeng, LUAN Yibo, et al. Similarities and differences of Beijing and Shanghai's land use changes induced by urbanization. Scientia Meteorologica (in Chinese), 2011, 31(4): 398-404.
- [20] CHEN Fei, Dudhia J. Coupling an advanced land surfacehydrology model with the Penn stateNCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. Mon. Wea. Rev., 2001, 129(4): 569-585.
- [21] Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. Boundary-Layer Meteor., 2001, 101 (3): 329-358.
- [22] 张亦洲, 苗世光, 戴永久, 等. 北京夏季晴天边界层特征及城 市下垫面对海风影响的数值模拟. 地球物理学报, 2013, 56

(8): 2558-2573.

ZHANGYizhou, MIAO Shiguang, DAI Yongjiu, et al. Numerical simulation of characteristics of clear day boundary layer in Beijing and the impact of urban underlying surface the sea breeze. Chinese Journal Geophysics(in Chinese), 2013, 56(8): 2558-2573.

[23] 伍见军,王咏薇,朱彬,等. WRF模式中城市冠层参数化方案 在重庆气象环境模拟中的性能比较.长江流域资源与环境, 2013,22(12):1627-1634.

WU Jianjun, WANG Yongwei, ZHU Bin, et al. Performance comparison of different urban canopy schemes in WRF model under Chongqing meteorological simulation. Resources and Environment in the Yangtze Basin(in Chinese), 2013, 22(12): 1627-1634.

- [24] 余江,江志红,俞卫,等.风电场风速数值预报的误差分析及 订正. 气象科学, 2015, 35(5): 587-592.
  YU Jiang, JIANG Zhihong, YU Wei, et al. Error analysis and correction of wind speed humerical forecast at wind farm. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2015, 35 (5): 587-592.
- [25] 朱焱,杨金彪,朱莲芳,等.苏州城市化进程与城市气候变化 关系研究. 气象科学, 2012, 32(3): 317-324.
  ZHU Yan, YANG Jinbiao, ZHU Lianfang, et al. The investigation of the relationship between urbanization process and climate change in Suzhou. Journal of the Meteorological Sciences(in Chinese), 2012, 32(3): 317-324.
- [26] 刘寿东,姜润,王成刚,等.南京夏季城市热岛时空分布特征的观测分析.大气科学学报,2014,37(1):19-27.
  LIUShoudong, JIANG Run, WANG Chenggang, et al. Observation analysis on spatial and temporal distribution characteristics of summer urban heat island in Nanjing. Transactions of Amospheric Sciemes(in Chinese), 2014, 37(1): 19-27.
- [27] 赵亚芳,张宁,陈燕,等.苏锡常地区热岛观测与数值模拟研究.气象科学,2016,36(1):80-87.
  ZHAOYafang, ZHANG Ning, CHEN Yan, et al. Observation of urban heat islands over Su-Xi-Change Region and its numerical simulation. Journal of the Meteorological Sciences(in Chinese), 2016, 36(1): 80-87.
- [28] Miralles D G, Teuling A J van Heerwaarden cc, et al. Megaheatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation. Nature Geosc., 2014, 7 (5): 345-349.
- [29] Pal S, Xueref-Remy I, Ammoura L, et al. Spatio-temporal variability of the atmospheric boundary layer depth over the Paris agglomeration: An assessment of the impact of the urban heat island intensity. Atmos. Environ., 2012, 63: 261-275.
- [30] Pal S, Lopez M, Schmidt M, et al. Investigation of the atmospheric boundary layer depth variability and its impact on the <sup>222</sup>Rn concentration at a rural site in France. J. Geophys. Res. Atmo., 2015, 120(2): 623-643.
- [31] Lac C, Donnelly R P, Masson V, et al. CO<sub>2</sub> dispersion modelling over Paris region within the CO<sub>2</sub>-MEGAPARIS project. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 2013, 13(9): 4941-4961.