



南京复杂下垫面条件下的三维城市热环境模拟

王咏薇^{①②*},任侠^{①②},翟雪飞^{①②},刘寿东^①,王成刚^②^① 耶鲁—南京信息工程大学大气环境中心,江苏 南京 210044;^② 南京信息工程大学 大气物理学院,江苏 南京 210044

* 联系人, E-mail: wyw@nuist.edu.cn

2011-06-08 收稿, 2014-05-28 接受

国家自然科学基金资助项目(41005012);江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD);长江学者和创新团队发展计划

摘要 运用 WRF 模式,选取考虑城市冠层结构(UCM 算例)及不考虑城市冠层(NUCM 算例)两种城市下垫面参数化方案,对南京 2010 年夏季晴天小风典型天气条件下的城市热环境以及不同下垫面的边界层特征进行了模拟研究。结果表明:1)UCM 方案模拟结果与实际情况较为吻合。其中 2 m 气温的模拟有较大的改进,模拟结果明显高于 NOUCM 方案,与观测更为吻合,同时更好地模拟出了冠层建筑物对于近地层风速的拖曳,10 m 风速的模拟有非常明显地提高。2)UCM 方案较好地模拟出了城市的三维热岛分布。由于建筑物地表对辐射的截留,白天 14 时(北京时间,下同)热岛较强,地面 2 m 高度处热岛范围较大,热岛面积大约为 120 km²,强度为 2℃。同时建筑物的存在使得城市湍流动能更大,向上的垂直扩散增加,距地面 20 m 时,依然能看出明显的热岛效应,热岛强度为 1.5℃。距地面 55 m 处,UCM 模拟所得的热岛范围缩小,热岛强度为 1.1℃。UCM 模拟所得的白天地表热量的扩散影响可达 143 m,02:00 2 m 处热岛最强为 2℃,热岛影响也可达 70 m 以上。3)不同下垫面呈现出了不同的边界层特征,城市冠层结构对周边下垫面边界层结构存在程度不等的影响,14:00 城市区域的湍流混合更强,城市边界层高度升高 100 m 左右,02:00,城市冠层结构的存在,导致近郊庄稼下垫面及紫金山植被下垫面的稳定逆温层结明显减弱。

关键词

WRF 模式

城市冠层结构

三维热岛

复杂下垫面

城市化进程的加剧,对城市气候有着深远的影响(Grimm et al., 2008),由其引起的城市热岛现象已经引起了广泛的关注(蒋维楣等, 2010)。近年来,不断有各国学者投入到这一研究领域中,如 Bornstein and Lin(2000)对美国亚特兰大的城市热岛效应研究, Yoshikada(1992)对日本东京的城市热环境研究,刘红年等(2008)、倪敏莉等(2009)、司鹏等(2010)、赵小艳等(2009)、董良鹏等(2014)对我国城市热岛效应的研究。该研究领域的一个重要进展是将城市冠层引入陆面过程进行城市热环境的气象研究。Oke(1987)首次提出城市冠层(Urban Canopy Layer)的概念,将城市冠层与城市边界层划

分开。根据 Oke 的定义,城市冠层为从地面到建筑物屋顶的这一层,它与建筑物高度、几何形状、密度、建筑材料、街道宽度和走向等关系密切;城市边界层则是从建筑物屋顶到积云中上部高度这一层,它与城市冠层存在着物质、能量交换。城市冠层的存在会影响到城市大气热力过程和动力过程,从而影响城市边界层结构。

大量研究工作随着冠层概念的提出而展开, Masson(2000)提出了一个较复杂的能够预报城市路面、墙面和屋顶温度的城市能量收支参数化方案 TEB(Town Energy Balance Scheme),随后 Kusaka et al.(2004)等学者将此方案进行了优化和完善。

引用格式:王咏薇,任侠,翟雪飞,等,2016.南京复杂下垫面条件下的三维城市热环境模拟[J].大气科学学报,39(4):525-535.

Wang Y W, Ren X, Zhai X F, et al., 2016. Numerical study of the three-dimensional thermal environment over a complex underlying surface in Nanjing[J]. Trans Atmos Sci, 39(4): 525-535. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20110608002. (in Chinese).

Kondo and Liu (1998)、Kondo and Kikegawa (2003)、Kondo et al. (2005)、Martilli et al. (2002)、王咏薇和蒋维楣(2009)建立了多层冠层模式,考虑引入了三维建筑物分布,提高了城市区域气候模拟性能。Martilli (2009)则在建立多层冠层模式的工作中,提出了引入实际城市的建筑物形态学的技术方案,进一步促进了城市冠层参数化研究进展。

虽然当前城市冠层模式研究尚处于冠层模式建立及验证的阶段,但有一个普适性的结论:城市冠层是影响城市环境及大气运动数值模拟研究的一个不可或缺的物理过程(王咏薇等,2008)。因此,很多的学者将引入建筑物冠层热储影响的中尺度模式运用于城市热环境的研究,如 Zhang et al. (2008)用 RAMS 模式对中国重庆地区的城市热岛现象进行了模拟,Miao et al. (2009)用 WRF 模式对北京的城市热岛现象进行了模拟,蒙伟光等 (2010)用 WRF 模式对广州地区的城市热岛现象进行了模拟,宋静等 (2009)、宋迅殊等 (2011)、叶丽梅等 (2014)同样利用 WRF 模式对南京地区的城市热岛现象进行了模拟。

目前,对城市热环境的数值模拟研究工作已广泛开展,然而对城市三维热环境模拟分析还较少,本文选取我国长江三角洲地区典型城市南京作为研究对象,采用 WRF-UCM 进行了 2010 年 8 月 1 日 20 时—3 日 08 时(北京时间下同)共 36 h 的数值模拟

试验,对南京城市三维热岛分布特征,及不同下垫面边界层结构等要素及其形成机理进行了详细的分析,以研究复杂下垫面对气象环境的影响机理。

1 模式及算例

采用 WRF 中尺度天气数值模式,三层嵌套网格,网格距分别为 9 km, 3 km, 1 km。最里层格点数 100×100。模拟区域中心经纬度为 (118.46° E, 32.02°N)。垂直方向按照 σ 位面分成不等距的 43 层,其中 1 km 以下 14 层。模拟采用 MODIS 高分辨的下垫面数据,图 1 所示为南京模拟区域地形高度及下垫面类型分布。

为了更合理地模拟城市三维热环境,模拟中选用了 MYJ 边界层方案及 Noah 陆面过程。城市冠层方案的选择对于热岛的模拟至关重要,由于多层冠层过程能够更好地结合冠层影响的动力及热力过程,机理清晰等优点,本研究算例之一选用 WRF 模式中多层冠层方案 BEP 方案,称之为 UCM 算例,其中 BEP 方案的介绍参见 Martilli et al. (2002)对多层冠层模式的研究。为了对比 WRF 模式中城市冠层方案的影响,另外进行 NOUCM 方案的模拟,即将城市考虑为平坦水泥平板,通过提高水泥平板的粗糙度以及改变热属性等进行城市下垫面的考虑。

2010 年 8 月 1—3 日期间,南京进入三伏天,受副热带高压影响,以晴到多云天气为主,风速较小,

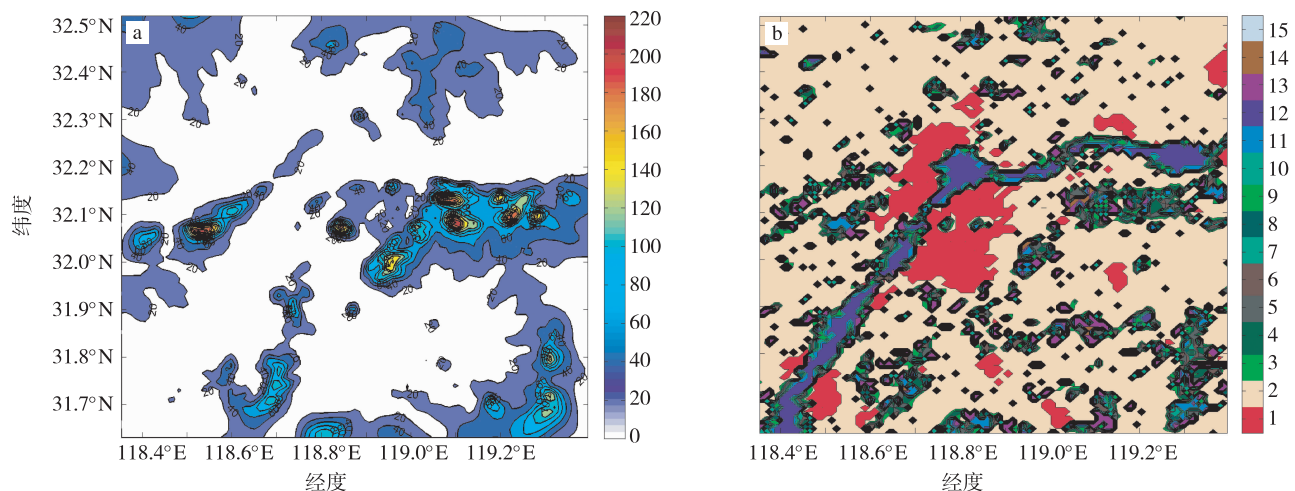


图 1 模拟区域地形高度分布及下垫面类型(下垫面类型图例说明:1 城市;2 干旱农作物和牧场;3 草地;4 灌木;5 混合灌木草地;6 热带稀疏大草原;7 落叶阔叶森林;8 落叶针叶森林;9 常绿阔叶林;10 常绿针叶林;11 混合森林;12 水体;13 草本湿地;14 木本湿地;15 冰雪) a.地形高度(单位:m);b.MODIS 下垫面类型

Fig.1 The (a) terrain height(units:m) and (b) MODIS land surfaces types of the simulation region (land surfaces categories: 1, urban and built-up land; 2, dryland cropland and pasture; 3, grassland; 4, shrubland; 5, mixed shrubland/grassland; 6, savanna; 7, deciduous broadleaf forest; 8, deciduous needleleaf forest; 9, evergreen broadleaf forest; 10, evergreen needleleaf forest; 11, mixed forest; 12, water body; 13, herbaceous wetland; 14, wooded wetland; 15, snow or ice)

盛行下沉气流,正午最高温度达到了 38°C 以上。本文进行 2010 年 8 月 1 日 20 时—3 日 08 时共 36 h 的数值试验,对南京城市三维热岛分布特征进行模拟。

2 模拟结果验证

首先应用南京市自动气象站观测的逐时风速、温度以及热岛强度对模拟结果进行检验。分别选取南京光华东街站($118.80^{\circ}\text{E}, 32.03^{\circ}\text{N}$)、南京九中站($118.79^{\circ}\text{E}, 32.05^{\circ}\text{N}$)和南京瑞金小区站($118.80^{\circ}\text{E}, 32.03^{\circ}\text{N}$)作为代表站。

图 2 为模拟与观测的近地面气温(2 m)和风速(10 m)的对比。将南京光华东街站、南京九中站、南京瑞金小区站观测的气温与两种方案模拟结果进行对比。从图 2a、c、e 中可以看出,两种方案模拟所得的 2 m 气温与观测值趋势变化基本吻合,最大误差为 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。进一步对比两种方案模拟结果,UCM 方案的模拟结果与观测更接近。在净辐射收入最大

时间 10:00—16:00, UCM 模拟的气温比 NOUCM 高 2°C 左右,主要是因为冠层方案考虑了建筑物对太阳短波辐射的多重反射作用,导致入射的短波辐射截陷在冠层以内,具有更多的辐射热加热大气,近地层气温更高。夜间净辐射支出在 00:00—06:00 时最大, UCM 模拟所得的温度同样更高,与观测较为吻合,其原因也是因为当夜间城市地表净辐射主要为长波支出时,冠层的多重反射作用使支出的长波尽可能地停留在冠层内,冠层内辐射热量的损失不至于太快,近地层的降温幅度也较小,与模拟结果更为吻合。南京光华东街站,九中站,瑞金小区站三站的观测气温与两种模拟方案的对比结果都呈现出了上述相同的变化趋势。

南京光华东街站,九中站,瑞金小区站三个站风速观测与两种方案模拟结果的对比也呈现近乎相同的趋势。UCM 方案更加合理地考虑了建筑物对气流运动的拖曳影响,在湍能方程及动量方程中都引入了考虑建筑物形态的影响项,同时近地层地气交

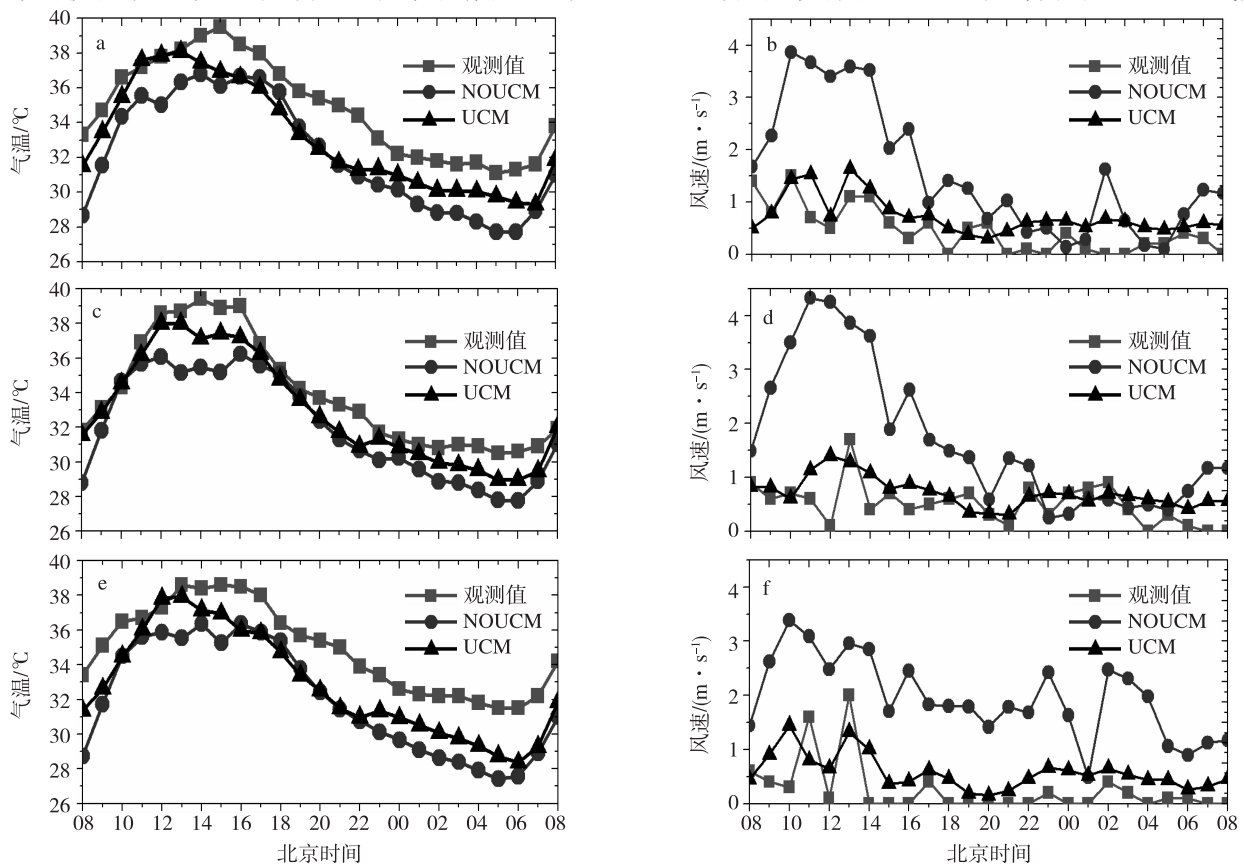


图 2 近地面温度(2 m)及风速(10 m)模拟结果与观测值的对比 a.光华东街站 2 m 气温;b.光华东街站 10 m 风速;c.九中站 2 m 气温;d.九中站 10 m 风速;e.瑞金小区站 2 m 气温;f.瑞金小区站 10 m 风速

Fig. 2 Comparison of simulated and observed (a, c, e) 2-m temperature and (b, d, e) 10-m wind speed at (a, b) Guanghuadongjie station, (c, d) Jiuzhong station, and (e, f) Ruijinxiaoqu station

换计算过程中,奥布霍夫长的计算中也引入了城市冠层的影响,计算所得的风速明显优于 NOUCM 方案。UCM 模拟所得风速大小和观测较为一致,而 NOUCM 模拟结果在白天明显大于观测。由此可知,UCM 方案合理考虑了冠层结构的动力及热力效应,模拟结果更为合理。

图 3 所示为两种方案模拟及观测所得热岛强度日变化分布。所得到的热岛强度是城市测站和郊区测站取平均作差得到的结果。由图可见,观测数据分析出的热岛强度夜间 21:00 达到极大值 4°C , UCM 方案模拟的为 3°C 左右,而 NOUCM 方案模拟的仅为 1.5°C 左右。从热岛强度变化趋势来看,UCM 模拟的城市热岛强度日变化趋势平缓,与观测比较吻合。NOUCM 方案模拟的热岛强度存在明显的日变化,且幅度较大,15:00—19:00 热岛强度较大。夜间由于 NOUCM 方案中城市地表为平坦水泥板,白天吸收的热量迅速释放,热岛强度明显降低。而 UCM 方案中考虑了建筑物对辐射的截留效应,城市热量损失速度较慢,热岛强度变化趋势也较缓,与实际情况更吻合。在观测数据中,16:00—18:00 热岛强度较小,这可能与高大建筑物的遮阳作用以及气溶胶有关,蒙伟光等(2007)研究结果也有类似的过程。而在 WRF 模式的模拟中,由于冠层方案假设城市内建筑物高度为统一高度,因此在辐射阴影遮蔽的考虑并不能完全和实际情况一样,因此 UCM 模拟结果并无 16:00—18:00 的减小过程。

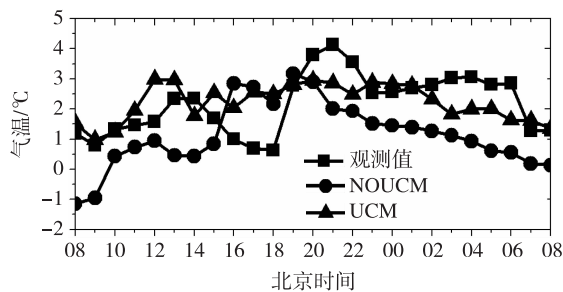


图 3 热岛强度模拟结果与观测值的对比

Fig.3 Comparison of simulated and observed UHI strength

通过以上模拟结果与观测数据的比较可知,采用 WRF 模式,选取 UCM 对南京近地层气象环境的模拟性能良好,可以利用其结果进行南京三维热环境特征的模拟分析。

3 南京复杂下垫面条件下的城市三维热环境特征

3.1 三维热环境特征

图 4 所示为 NOUCM 和 UCM 两种方案模拟所得 14:00 三维气温分布。由图 4 可见,UCM 方案较好模拟出了 14:00 城市热岛分布,热岛结构清晰,近地面 2 m 高度处热岛范围较大,热岛面积大约为 120 km^2 ,强度较强,为 2°C 。2 m 高度上 UCM 模拟所得热岛面积明显大于 NOUCM 方案,大约是其 3 倍,而由于 NOUCM 方案中不考虑建筑拖曳作用,水平风速较大,将城市热量水平输送,模拟所得郊区温度较 UCM 方案稍高,热岛效应较弱,NOUCM 模拟出的热岛强度为 1°C 。距地面 20 m 时,UCM 方案中依然能看出明显的热岛效应,热岛强度为 1.5°C ,NOUCM 方案中的热岛范围已明显减小,热岛强度明显减弱,为 0.8°C 。距地面 55 m 处,两种方案中的热岛面积继续减小,但 UCM 的热岛范围缩小较慢,UCM 热岛强度 1.1°C ,而 NOUCM 仅为 0.4°C 。到 143 m 高度处时,UCM 仍有微弱热岛效应,NOUCM 方案热岛效应基本消失。白天南京城市热岛垂直延伸到高度 140 m 左右,地面热岛范围大约为 120 km^2 ,热岛最强 2°C 。

图 5 所示为 NOUCM 和 UCM 两种方案模拟所得夜间 02:00 三维气温分布。02:00 由于存在辐射逆温层的影响,模拟所得三维温度分布中,模拟区域在一定范围内温度随高度增加而增加。观察距地面 2 m 处,UCM 方案模拟所得热岛强度为 2°C ,具有较明显的城市热岛现象,这是由于受城市建筑物冠层结构的影响,白天城市区域吸收更多的热量储存于地表,在夜间建筑物冠层对于地气长波辐射的截留使白天储存的能量无法完全释放,从而导致夜间城市降温较缓,城市区域始终处于高温区域。而 NOUCM 方案中,由于只是把城市看成水泥地面,导致城市夜间降温很快,到 02:00 热岛效应已不再明显,同时由于降温快,城市某些区域 (118.85°E , 31.95°N) 温度甚至低于周围的林地。随着高度的增加,UCM 方案中的热岛面积缩小较慢,到距地面 20 m 处热岛仍有一定的影响,50 m 处逐渐减弱,一直扩散到 70 m 以上,然而 UCM 方案中的城市区域受冠层作用影响,大量热量储存在冠层内,没有明显逆温现象,而 NOUCM 方案中热岛面积随高度迅速缩小,在 20 m 处就已没有热岛现象,并且有明显的逆温现象。

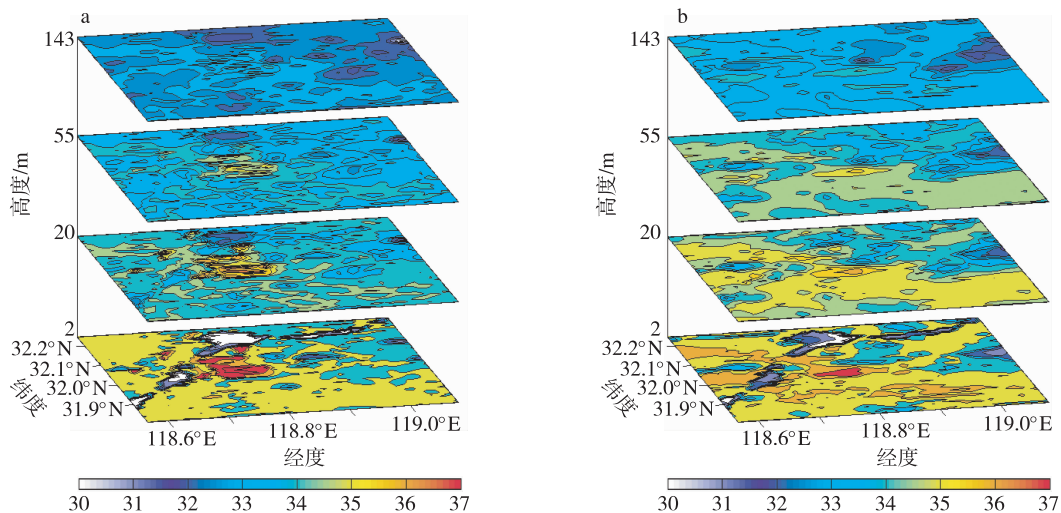


图4 两种方案模拟所得 14:00 三维温度(单位:℃) a. UCM 方案; b. NOUCM 方案

Fig.4 Three-dimensional temperature (units:℃) of the (a) UCM scheme and (b) NOUCM scheme, at 14:00 BST

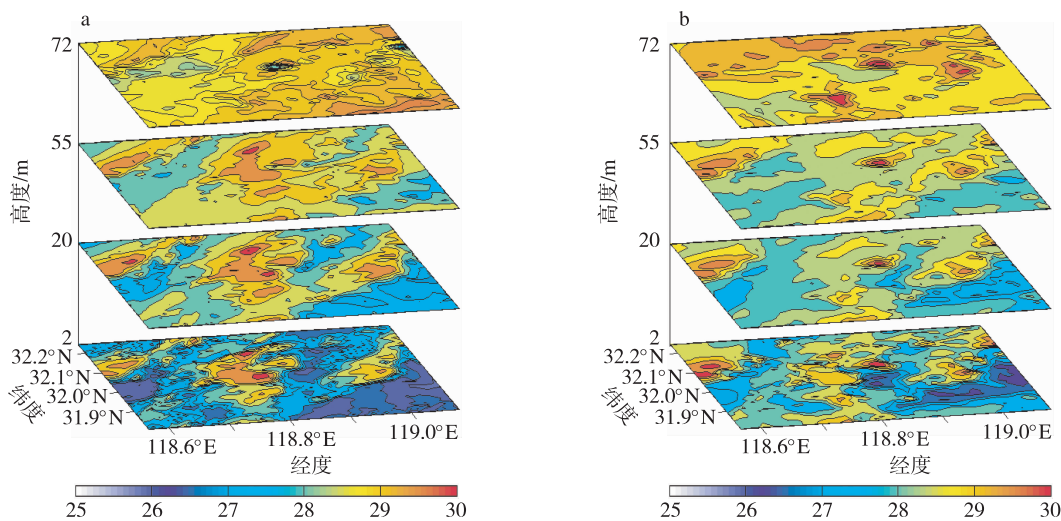


图5 两种方案模拟所得 02:00 三维温度(单位:℃) a. UCM 方案; b. NOUCM 方案

Fig.5 Three-dimensional temperature (units:℃) of the (a) UCM scheme and (b) NOUCM scheme, at 02:00 BST

由上面的分析可以看出 UCM 方案中,无论是白天还是夜晚,城市热岛都较强,且其在垂直方向上能影响到更高的位置。究其原因,建筑物冠层使城市区域更多的能量被截留的同时,建筑物对气流的拖曳影响使城市区域风速减小,更多的动能转化为切变湍能,这两项作用使城市区域机械湍能及热力湍能同时增加,城市区域的湍能扩散更大,使得热量向上的扩散较强。图 6 为沿着一点(118.55°E, 32.03°N)与另一点(119.10°E, 32.03°N)连线的垂直剖面,等值线为垂直风速。其中黑色实线 118.7~118.8°E 的范围为城市。由图可见 UCM 方案中,城市内部存在更大更明显的湍流。UCM 中的最大上

升速度达到 1.5 m/s,而 NOUCM 方案中仅为 1 m/s。这是由于建筑物拖曳影响使城市下垫面风速减小,从而使正午时大气中更多的动能转变为湍能,湍能扩散运动旺盛,UCM 方案计算的城市冠层内的湍能通量更大,从而更好地模拟出城市热岛环流的基本特征。在 118.6°E 与 118.9°E 附近的地区,分别处于长江与城市交界处以及城市与宝华山交界处,两种方案都有一定的湍流存在。图 7 为两种方案模拟所得湍流动能垂直剖面分布。由图可见,在 118.7~118.8°E 的城市区域,UCM 方案模拟的湍流动能明显大于 NOUCM 方案,其湍流动能最大值达到 $3 \text{ m}^2/\text{s}^2$,而 NOUCM 方案仅为 $1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

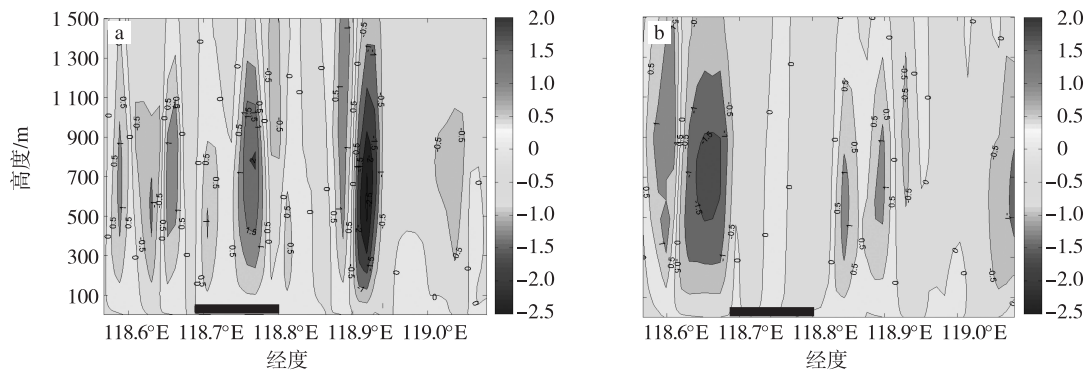


图 6 两种方案模拟所得 14:00 垂直风速剖面(单位:m/s) a. UCM 方案; b. NOUCM 方案

Fig.6 Two schemes' vertical velocity profiles (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of the (a) UCM scheme and (b) NOUCM scheme, at 14:00 BST

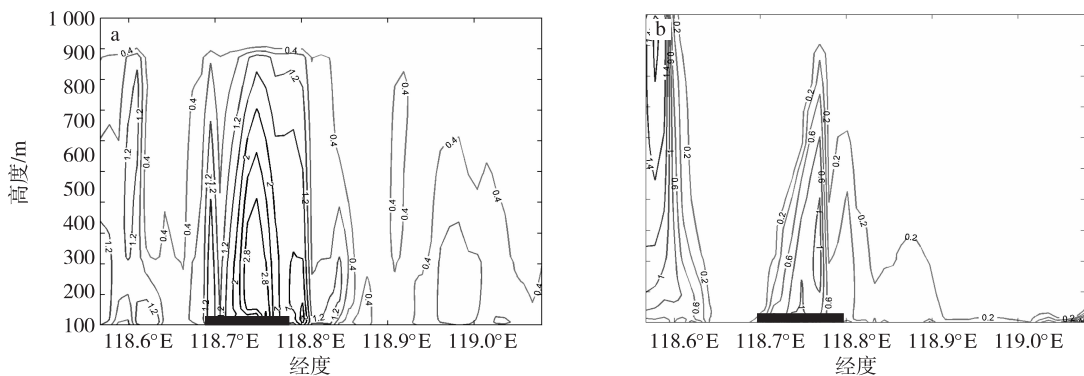


图 7 两种方案模拟所得 14:00 湍动能剖面(单位: m^2/s^2) a. UCM 方案; b. NOUCM 方案

Fig.7 Two schemes' turbulent kinetic energy profiles (units: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) of the (a) UCM scheme and (b) NOUCM scheme, at 14:00 BST

同时 UCM 方案中的湍涡明显较大。这都说明,建筑物的存在使得更多的能量截留在冠层内,同时也将动能更多地转化为湍能,从而使得 UCM 模拟的湍动能较大,也就使得热岛现象随高度减弱的程度较慢,热量能扩散到更高的高度。

综上,UCM 方案较好地模拟出了南京非均匀下垫面的城市三维热岛分布。日间 14:00,近地层 2 m 热岛强度最大为 2°C ,最大影响范围达到 120 km^2 ,垂直方向上热岛范围可达到 143 m。夜间 02:00 近地层 2 m 热岛强度最大为 2°C ,垂直影响范围可达 55 m 左右,由于热岛的影响,城市区域上空并未出现逆温层结。

3.2 不同下垫面条件下的热环境及边界层结构特征

3.2.1 垂直位温廓线

南京地区下垫面复杂,包括长江水域,大范围城市下垫面,以及郊区庄稼下垫面,也包括城东紫金山的树木植被下垫面。进一步分析选取城市,近郊,远郊,紧靠城市的长江以及被城市环绕的紫金山等五

种下垫面,对不同下垫面的热环境及边界层结构特征进行分析。五种下垫面在模拟区域中对应点经纬度为城市 ($118.84^\circ\text{E}, 32.07^\circ\text{N}$)、近郊点庄稼下垫面 ($118.55^\circ\text{E}, 32.16^\circ\text{N}$)、远郊点庄稼下垫面 ($118.42^\circ\text{E}, 32.46^\circ\text{N}$)、长江水域下垫面 ($118.7578^\circ\text{E}, 32.1379^\circ\text{N}$)、紫金山植被下垫面 ($118.8429^\circ\text{E}, 32.0744^\circ\text{N}$)。

图 8 为两种方案模拟所得不同下垫面 14:00 位温垂直廓线。由图 8a 可见,在城市下垫面,UCM 方案模拟所得地表温度高达 35.4°C ,NOUCM 为 35°C 。城市区域混合层高度达 900 m,UCM 方案模拟结果所得位温在混合层高度内垂直分布,表明强的垂直混合作用,而 NOUCM 方案模拟结果中位温廓线略倾斜,垂直混合作用稍弱,表明冠层结构的考虑使动力湍流以及热力湍流均加强,使边界层内的垂直混合作用加强。在近郊点(图 8b),UCM 模拟温度略小于 NOUCM 方案,而 UCM 方案中湍流垂直混合作用明显要大于 NOUCM 方案。主要原因在于受冠层的影响,水平风速减小,城市区域平均动能

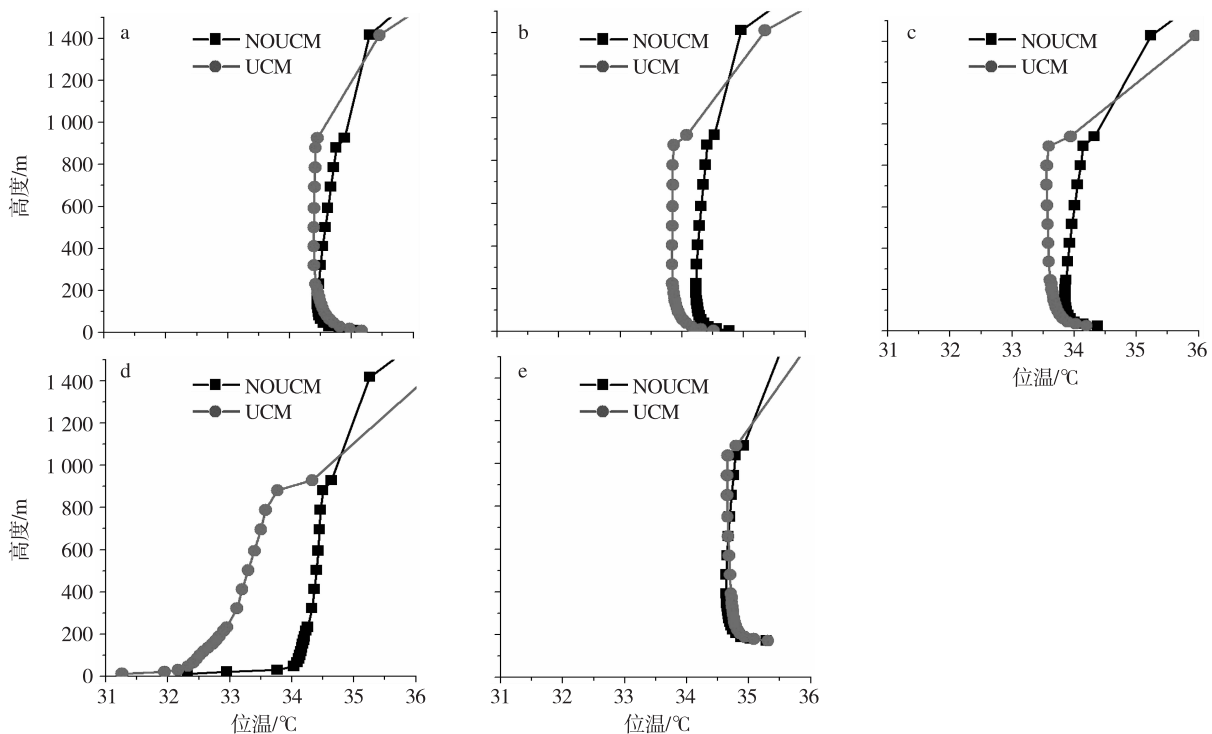


图8 五种不同下垫面模拟所得 14:00 垂直位温廓线 a.城市点;b.近郊点;c.远郊点;d.长江水域;e.紫金山植被点

Fig.8 Vertical profiles of potential temperature over five different underlying surfaces at 14:00 BST: (a) urban; (b) suburban; (c) outer suburbs; (d) Yangtze River; (e) Purple Mountain

转化为湍流动能,使得垂直方向上的混合更为充分,而 NOUCM 近地层的水平输送作用更强,热量向城市区域四周输送,从而导致在近郊点,NOUCM 的近地层气温更高。在远郊点(图 8c)显示出了同样的趋势,随着离城市距离的增加,城市的影响逐渐减小,两种方案近地层温度的差异减小。如图 8d 是紧靠城市的长江水体,由图可见,受水体的影响,14:00 长江近地层位温明显小于其他下垫面类型,由于水体表面光滑,粗糙度较小,在水体上空并未形成明显的湍流交换,因此没有形成明显的混合层。同时因水体热容较大,白天靠近水体的近地层升温缓慢,水体上方近地层形成明显的逆温层结。比较两种方案模拟结果,NOUCM 方案模拟长江水体温度较高,主要是因为 NOUCM 模拟方案中,水平风速较大,当日盛行偏南气流,长江位于城市下风方,因此城市热量向下风方水平输送,而 UCM 方案城市风速小,湍能将热量向上传输,对下风方长江水体影响不大。如图 8e 是被城市环绕的紫金山植被下垫面的垂直位温分布,从图中看出,其垂直位温廓线受城市冠层影响,UCM 方案模拟的混合层位温更为垂直,湍流混合更为充分,而 NOUCM 方案位温廓线相对较为倾斜,湍流混合略弱,由于地形高度为近 200 m,紫金山植被下垫面边界层高度达到 1 100 m。对于紧

靠城市的不同下垫面类型来说,城市冠层对不同的下垫面产生了不同程度的影响。

3.2.2 垂直气温廓线

图 9 为两种方案模拟所得不同下垫面 02:00 气温垂直廓线。下垫面分别为城市、近郊、远郊、紧靠城市的长江以及被城市环绕的紫金山。由图 9a 可见,在城市,UCM 方案中辐射逆温的现象没有 NOUCM 明显,近地表温度明显高于 NOUCM 方案,这是由于在夜间冠层内各表面白天储存的热量都向大气释放,辐射方案考虑了各个面对辐射能量的多重反射作用,因此,与 NOUCM 的计算相比,UCM 方案夜间有相对更多的能量留存在城市冠层内,使冠层内的气温不会迅速降低。而 NOUCM 方案将城市作为平坦水泥板,因此在夜间近地面温度迅速降低,辐射逆温层现象更加明显。在近郊点(图 9b),UCM 方案中,近郊的垂直气温廓线受到城市的影响,仍然能体现出城市建筑物的冠层作用,而在远郊(图 9c)这种差别进一步减小。对于下垫面较为靠近城市的水体(图 9d),近地面主要受水体影响,长江的温度小于城市温度。其垂直气温分布在 100 m 以下主要受水体的影响,UCM 和 NOUCM 方案模拟的气温都存在逆温现象,然而到了 100~250 m,水体对气温的影响减弱,由于受城市影响,UCM

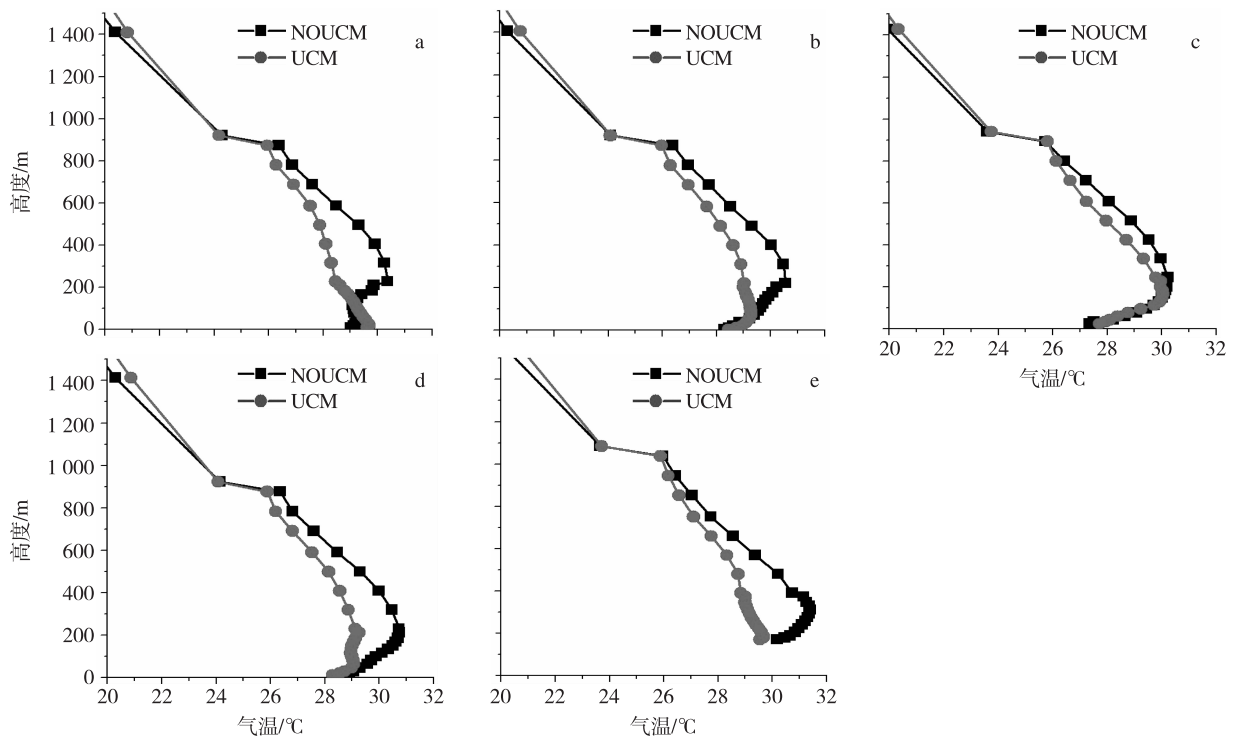


图 9 五种不同下垫面模拟所得 02:00 垂直气温廓线 a.城市点;b.近郊点;c.远郊点;d.长江水域;e.紫金山植被点
Fig.9 Vertical profiles of potential temperature over five different underlying surfaces at 02:00 BST: (a) urban; (b) suburban; (c) outer suburbs; (d) Yangtze River; (e) Purple Mountain

方案模拟的气温的逆温明显低于 NOUCM 方案。对于被城市环绕的紫金山植被下垫面(图 9e),城市对其影响更加明显,100 m 以下为山体,100 m 以上,UCM 方案模拟的气温几乎没有逆温现象,温度随着高度增加而减小,而 NOUCM 方案模拟的气温在 100 m 以上仍然有明显的逆温现象,直到 250 m 以上才消失。

综上所述,不同下垫面的三维温度及边界层结构存在明显差异,而城市建筑物的存在,对周边不同下垫面的气象环境及边界层结构产生了显著的影响,在城市,由于城市建筑物的多重反射作用,将更多热量保留在城市内,近地面 UCM 方案模拟的城市温度较高,同时,由于建筑物的阻挡作用,使得夜间地表辐射热量储存在城市内部,阻碍其扩散到高空,因此在城市没有明显的逆温现象。这种影响可以延伸到郊区以及被城市环绕的不同下垫面,减小了近郊以及水体、山体等不同下垫面的夜间逆温程度。而对于城市附近的下垫面类型来说,其受城市冠层影响的程度各不同。在陆地,越靠近城市的地区受城市冠层影响越大,在近郊,可以看出明显的混合层高度抬升;下垫面为水体时,水体本身对边界层的影响很大,其受城市冠层的影响相对不明显;而对于城市中山体植被下垫面,城市冠层对其边界

层影响较为明显。

4 结论

采用 WRF 模式,考虑 UCM 以及 NOUCM 两种城市下垫面参数化方案,对南京 2010 年夏季晴天小风典型天气条件下的城市三维热环境以及不同下垫面的边界层特征进行了模拟研究。主要结论如下:

1)UCM 方案合理考虑了建筑物的动力及热力效应,模拟结果与近地面 2 m 气温、10 m 风速以及热岛强度的变化趋势一致,量级吻合,表明本次模拟结果与实际情况吻合。

2)UCM 方案较好地模拟出了城市的三维热岛分布,由于 UCM 方案中考虑了建筑物地表对辐射的多重反射效应,从而白天截留更多的热量,白天热岛较强,地面 2 m 高度处热岛范围较大,热岛面积大约为 120 km²,强度为 2 °C。同时近地层建筑物的存在使得城市湍流动能更大,向上的垂直扩散增加,距地面 20 m 时,UCM 方案中依然能看出明显的热岛效应,热岛强度为 1.5 °C。距地面 55 m 处,UCM 模拟所得的热岛范围缩小,UCM 热岛强度为 1.1 °C,白天地表热量的扩散影响可达 143 m,夜间 2 m 高度处热岛强度为 2 °C,热岛效应可达 70 m 以上。白天及夜间,UCM 方案模拟热岛范围随高度缩小以

及强度减小的趋势相对 NOUCM 方案较缓,表现出更明显的三维热岛特征。

3)不同下垫面呈现出了不同的边界层特征,同时城市冠层作用对周边不同下垫面的边界层结构存在程度不等的影响。由于城市三维立体下垫面的持热作用,白天及夜间对辐射能量的截陷,使得白天混合层更强,夜间没有逆温现象,并进而影响城市近郊,使得夜间逆温不明显,而对于远郊,这种影响相对减小;对于水体,近地面位温及气温主要受水的影响,因而基本看不出城市所产生的作用,而达到一定高度时,城市对水体的影响逐渐显现;而对于城市内

部的紫金山,城市所产生的作用相对明显,采用 UCM 方案,夜间并无明显逆温现象。

本文采用 WRF 模式,对基于复杂地形地貌条件下的 2010 年夏季晴天小风典型天气条件下的南京市三维热环境特征及不同下垫面边界层特征进行了分析,并得出了一定有意义的结论。但是本次模拟中,对城市影响较明显的人为热通量,以及实际的建筑物高度密度等资料并未引入,进一步的工作中,将引入时空变化的人为热通量分布,以及实际的建筑物分布数据进行模拟。

参考文献 (References)

- Bornstein R, Lin Q, 2000. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies [J]. *Atmos Environ*, 34(3): 507-516.
- 董良鹏, 江志红, 沈素红, 2014. 近十年长江三角洲城市热岛变化及其与城市群发展的关系 [J]. *大气科学学报*, 37(2): 146-154. Dong L P, Jiang Z H, Shen S H, 2014. Urban heat island change and its relationship with urbanization of urban agglomerations in Yangtze River Delta in past decade [J]. *Trans Atmos Sci*, 37(2): 146-154. (in Chinese).
- Grimm N B, Faeth H, Golubiewski E, et al., 2008. Global change and the ecology of cities [J]. *Science*, 319(5864): 756-760.
- 蒋维楣, 苗世光, 张宁, 等, 2010. 城市气象与边界层数值模拟研究 [J]. *地球科学进展*, 25(5): 463-473. Jiang W M, Miao S G, Zhang N, et al., 2010. Numerical simulation on urban meteorology and urban boundary layer [J]. *Advances in Earth Science*, 25(5): 463-473. (in Chinese).
- Kondo H, Liu F H, 1998. A study on the urban thermal environment obtained through one-dimensional urban canopy model [J]. *J Japan Soc Atmos Environ*, 33(3): 179-192.
- Kondo H, Kikigawa Y, 2003. Temperature variation in the urban canopy with anthropogenic energy use [J]. *Pure Appl Geophys*, 160(1/2): 317-324.
- Kondo H, Genchi Y, Kikigawa Y, et al., 2005. Development of a multi-layer urban canopy model for the analysis of energy consumption in a big city: Structure of the urban canopy model and its basic performance [J]. *Bound-Layer Meteor*, 116(3): 395-421.
- Kusaka H, Kondo H, Kikigawa Y, et al., 2004. A simple single layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multilayer and slab model [J]. *Bound-Layer Meteor*, 101(3): 329-358.
- 刘红年, 蒋维楣, 孙鉴宁, 等, 2008. 南京城市边界层微气象特征观测与分析 [J]. *南京大学学报: 自然科学版*, 44(1): 99-106. Liu H N, Jiang W M, Sun J N, et al., 2008. An observation and analysis of the micrometeorological characteristics of the Nanjing urban boundary layer, eastern China [J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 44(1): 99-106. (in Chinese).
- Martilli A, 2009. On the derivation of input parameters for urban canopy models from urban morphological datasets [J]. *Bound-Layer Meteor*, 130(2): 301-306.
- Martilli A, Clappier A, Rotach M, 2002. An urban surface exchange parameterization for mesoscale models [J]. *Bound-Layer Meteor*, 104(2): 261-304.
- Masson V, 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models [J]. *Bound-Layer Meteor*, 94(2): 357-397.
- 蒙伟光, 闫敬华, 扈海波, 2007. 热带气旋背景条件下的城市效应与广州夏季雷暴 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 37(12): 1660-1668. Meng W G, Yan J H, Hu H B, 2007. Urban effects and summer thunderstorms in a tropical cyclone affected situation over Guangzhou city [J]. *Science China: Earth Sciences*, 37(12): 1660-1668. (in Chinese).
- 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 W G, Zhang Y X, Li J N, et al., 2010. Application of WRF/UCM in the simulation of a heat wave event and urban heat island around Guangzhou City [J]. *J Trop Meteor*, 26(3): 273-282. (in Chinese).
- Miao S G, Chen F, Lemone M A, et al., 2009. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 48(3): 484-501.
- 倪敏莉, 申双和, 张佳华, 2009. 长江三角洲城市群热环境研究 [J]. *大气科学学报*, 32(5): 711-715. Ni M L, Shen S H, Zhang J H, 2009. A Study on thermal environment of urban group in Yangtze River Delta [J]. *Trans Atmos Sci*, 32(5): 711-715. (in Chinese).
- Oke T, 1987. The surface energy budgets of urban areas [M] // Hosker P R. *Modeling the Urban Boundary Layer*. AMS, Boston.
- 司鹏, 李庆祥, 李伟, 等, 2010. 城市化对深圳气温变化的贡献 [J]. *大气科学学报*, 33(1): 110-116. Si P, Li Q X, Li W, et al., 2010. Urbanization-induced surface air temperature change in Shenzhen [J]. *Trans Atmos Sci*, 33(1): 110-116. (in Chinese).
- 宋静, 汤剑平, 孙鉴宁, 2009. 南京地区城市冠层效应的模拟试验研究 [J]. *南京大学学报: 自然科学版*, 45(6): 779-789. Song J, Tang J P, Sun J N, 2009. Simulation study of the effects of urban canopy on the local meteorological field in the Nanjing area [J]. *Journal of Nanjing University: Natural*

- Sciences, 45(6):779-789. (in Chinese).
- 宋迅殊, 陈燕, 张宁, 2011. 城市发展对区域气象环境影响的数值模拟: 以苏州为例[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 47(1):51-59. Song X S, Chen Y, Zhang N, 2011. Influences of urban development on meteorological environment a case study of Suzhou, eastern China[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 47(1):51-59. (in Chinese).
- 王咏薇, 蒋维楣, 2009. 多层城市冠层模式的建立及数值试验研究[J]. 气象学报, 67(6):1013-1024. Wang Y W, Jiang W M, 2009. Numerical study on development of a multi-layer urban canopy model[J]. Acta Meteorologica Sinica, 67(6):1013-1024. (in Chinese).
- 王咏薇, 蒋维楣, 刘红年, 2008. 大气数值模式中城市效应参数化方案研究进展[J]. 地球科学进展, 23(4):371-379. Wang Y W, Jiang W M, Liu H N, 2008. Advanced in research of urban effect parameterization scheme on models of atmosphere[J]. Advances in Earth Science, 23(4):371-379. (in Chinese).
- 叶丽梅, 江志红, 霍飞, 2014. 南京地区下垫面变化对城市热岛效应影响的数值模拟[J]. 大气科学学报, 37(5):642-652. Ye L M, Jiang Z H, Huo F, 2014. Numerical simulation of land cover change on the urban heat island effect in Nanjing[J]. Trans Atmos Sci, 37(5):642-652. (in Chinese).
- Yoshikada H, 1992. Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze[J]. J Appl Meteor, 31(1):1146-1164.
- Zhang H, Sate N, Izumi T, et al., 2008. Modified RAM-urban canopy model for heat island simulation in Chongqing, China[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(2):509-524.
- 赵小艳, 申双和, 杨沈斌, 等, 2009. 利用 ASTER 数据反演南京城市地表温度[J]. 南京气象学院学报, 32(1):128-133. Zhao X Y, Shen S H, Yang S B, et al., 2009. Land surface temperature of Nanjing retrieved from ASTER data[J]. J Nanjing Inst Meteor, 32(1):128-133. (in Chinese).

Numerical study of the three-dimensional thermal environment over a complex underlying surface in Nanjing

WANG Yongwei^{1,2}, REN Xia^{1,2}, ZHAI Xuefei^{1,2}, LIU Shoudong¹, WANG Chenggang²

¹Yale-Nuist Center on Atmospheric Environment, Nanjing 210044, China;

²School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Mass and energy exchanges in the urban canopy directly affect urban atmospheric thermodynamic and dynamic processes, and thus affect the structure of the urban boundary layer. Urban canopy parameterization is an indispensable physical process in the numerical simulation of atmospheric motion.

In the present work, simulations were conducted for the urban thermal environment of Nanjing under typical summer weather conditions (sunny days with weak wind), for the period 1—3 August 2010, using the WRF model. By selecting a parameterization that considered the urban canopy structure (UCM experiment), and one that did not (NOUCM experiment), the boundary layer characteristics over different underlying surfaces were examined. The results showed that:

(1) The UCM simulation results agreed with the observational data very well. The simulation of 2-m temperature was improved considerably compared to that of NOUCM. Moreover, the drag of buildings to near ground wind speed was better reflected; the simulation of 10-m wind speed was substantially improved. According to observational data analyses, the heat island intensity reached its maximum at 2100 BST, and was about 4 °C. The UCM scheme simulated a value of around 3 °C, while the NOUCM scheme simulation yielded a value of around 1.5 °C.

(2) The UCM experiment simulated the 3D heat island distribution favorably. Owing to the retention of radiation, the heat island at 1400 BST was relatively strong, and it covered a wide range at about 2 m above the ground (~120 km²), with an intensity of 2 °C. The heat island intensity in the NOUCM scheme simulation was 1 °C. Meanwhile, due to the existence of urban structures, the turbulent kinetic energy was greater and the upward vertical diffusion increased. At 20 m above the ground, an obvious heat island effect could still be found, and the intensity produced using the UCM scheme was 1.5 °C. The heat island range in the NOUCM experiment was substantially narrower, and the intensity was 0.8 °C. At around 55 m above the ground, the heat island range simulated using UCM narrowed, and the intensity was 1.1 °C; meanwhile, the intensity of the NOUCM scheme was only

0.4 °C. Based on the UCM simulation, the ground heat diffusion effect during the day reached 143 m, the heat island at 02:00 BST and 2 m above the ground reached a maximum of 2 °C, and there was a detectable heat island impact above 70 m. Based on the NOUCM simulation, however, the range of the simulated heat island shrank rapidly with height, and a heat island effect could not be found with an obvious inversion phenomenon.

(3) Different underlying surfaces produce distinct boundary layer features, with cities having distinct impacts on surrounding underlying boundary structures. During the day, turbulent mixing was enhanced at 14:00 BST in urban areas, and the urban boundary layer height increased to about 100 m. At night, the stable inversion stratification of the suburbs cropped the underlying surface, and the Purple Mountain vegetation underlying surface decreased significantly at 02:00 BST because of the presence of the urban canopy structure. For water, near-surface potential temperature and air temperature were mainly affected by the water. Cities have a limited impact on near-surface water; however, they appear to gradually influence surface water after a certain height.

WRF model; urban canopy structure; 3D UHI; complex underlying surface

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20110608002

(责任编辑:刘菲)