第17卷 第3期 2017年1月
1671—1815(2017)03-0016-14
科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering
Vol. 17 No. 3 Jan. 2017
© 2017 Sci. Tech. Engrg.

城市下垫面扩张对局地热力环流影响的模拟

王咏薇[1,2,3] 翟雪飞[1,2] 齐德莉[1,2] 黄 毅[2] 陈 磊[3]
(南京信息工程大学大气环境中心[1],大气物理学院[2],南京 210044;
中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室[3],北京 100029)

摘 要 采用WRF模式及其城市冠层参数化方案,选取2010年8月1日至3日晴天天气为模拟背景,两个算例分别为南京1993年土地利用类型及2010年土地利用类型分布。模式的模拟结果表明城市扩张使城区内2 m高度处气温有了一定幅度的增温,夜间24:00最大增温幅度达3 K。同时城市扩张使得城区风速明显减小,产生减速效应。对比两个算例风速的模拟结果,郊区风速均大于城区,风速低对物质的水平输送、扩散带来不利影响。由于城市热岛的影响,城区范围内产生有辐合上升的运动;随着城区面积的扩大,湍流动能强度及其影响范围也在扩大。2010年算例,正午湍流强度最大值与1993年算例相比较,由2.1 $m^2 \cdot s^2$ 增至2.7 $m^2 \cdot s^2$。城区内湍流运动较为强烈的区域,在一定程度上促进物质垂直方向上的输送与扩散。城市扩张后物质在城区上方垂直方向上湍流扩散得到加强,而在水平向下的输送受到抑制,更多地被阻隔在城市局地。

关键词 城市扩张 WRF模式 土地利用类型 局地热力环流 湍流动能
中图法分类号 P423.3; **文献标志码** A

随着当前社会经济的发展,城市人口急剧增长。世界银行近期发布的最新数据显示,2000至2010年期间东亚地区有近两亿人迁入城市,相当于世界第六大国的人口数[1]。为了适应城市人口的高速增长,城市面积相应急剧增大,引起大规模的土地覆被变化,建筑物、沥青或水泥马路等不透水下垫面代替了城市中大部分原有的农田、森林、河流、湖泊等自然地表覆盖。城市人口的急剧膨胀、城镇土地的快速扩张和经济的集聚发展,产生了一系列城市环境问题,对生态环境造成了巨大的压力[2—5]。

城市扩张导致土地利用发生变化,首先对地表能量平衡、局地气候及天气状况产生了直接的影响[6—11]。当土地利用由郊区改变为城市,建筑物增长,局地有效反照率增加,导致城市地表收获的净辐射能量增加,感热增加,而土壤湿度减小,潜热减小[12]。白天城市地表储存了更多的热量,夜间向大气释放,从而导致城市上空始终保持相对于郊区温度较高的状态。随着城市规模的增加,城市热岛效应更明显[7,13—17],城市的气象条件及天气状况也发生了显著的变化。纽约城市从1990年发展至规划的2050年,日间近地面温度将增加0.6 ℃,边界层高度增加150 m,水汽混合比增加0.6 $g \cdot kg^{-1}$,气象场变化的区域与城市化的区域几乎完全重合[18]。中国大城市北京、天津等随着城镇群发展,城市面积扩大,建筑物增长,人为热排放增加等变化导致城市地表特征参数的变化,其中建筑物的增高和加密对风速的拖曳作用加强[19,20]。周淑贞等人[21]对另外一个超大城市上海的研究表明,快速城市化过程中,大气流场水平、垂直分布具受到城区明显的影响。Matei[22]通过模式模拟一系列合理的城市未来情景的个例,探讨了城市扩张对区域气候的敏感性,结果表明合理的城市规划能够有效的抵消城市化带来的局地气候影响。

从全球来看,人口的迅速增加,工业化和无计划的快速城市化,造成空气污染问题越发严重。城市扩张,局地能量平衡发生变化的同时,复杂地表驱动的热力环流也发生了变化,影响了污染物质的输送扩散条件;并有可能改变污染物化学反应的速度及强度。不同性质下垫面上近地层的平均风速廓线存在的显著差异,将直接影响大气内物质的输送与扩散[23]。Lo[24] 2006利用MM5/MPTM在珠三角地区进行敏感性试验来考察不同的土地使用情况对物质输送的影响,结果表明,城市化会诱导或增强清晨及夜间的污染物截获;其中,清晨城区低蒸发量及建筑

2016年6月15日收到 国家自然科学基金(41275024)
公益性国家行业(气象)专项(GYHY201106049)、江苏高校优势学科建设工程(PAPD)、长江学者和创新团队发展计划共同资助
第一作者简介:王咏薇,女(1977—),新疆人,博士,副教授。研究方向:大气边界层与大气环境,以及陆面过程参数化方案。E-mail: wyw@nuist.edu.cn。
引用格式:王咏薇,翟雪飞,齐德莉,等. 城市下垫面扩张对局地热力环流影响的模拟[J]. 科学技术与工程,2017,17(3):16—28
Wang Yongwei, Zhai Xuefei, Qi Deli, et al. Simulation of the land-use change effect on urban local thermodynamic circulation[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(3): 16—28

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

物的低热容都将导致该区域的升温比周围郊区要快得多，该区域的温度升高将产生气流辐合，造成清晨物质的积聚; 夜间，城区的表面温度降得没有郊区快，相较于海面表面温度，甚至更高，因此形成一个较弱的陆风，不利于物质的输送扩散。快速城镇化过程中，土地覆被类型改变对大气污染物扩散、转化和积累的影响在季节尺度上特征明显，冬季(雨季)和夏季(旱季)污染物扩散分布特点具有明显差异[25]。城市建设规模和格局不同，对城市气象环境的影响不同，由于地气多因子的相互影响和反馈作用，城市建设规模的变化对周边的环境也存在着显著的影响[26,27]。Civerolo[28]进行了土地利用及土地覆盖情况对气象场、空气质量的敏感性分析，结果表明，结合历史气象条件去评估未来空气质量具有一定的指导和实践意义。

南京作为长江下游地区重要的产业城市和经济中心，是长三角地区重要的交通枢纽; 该市地形地貌较为复杂，主城区位于秦淮河与长江共同作用形成的高河漫滩上，四周丘陵起伏，属于宁镇山脉的西部尽端，占全市 64.5% 的低山丘陵成为南京的主要地貌特征[29]。改革开放 40 多年来，南京一直保持良好的经济发展势头，城市人口不断增加，城市建成区面积也不断扩张，至 2010 年底，南京城市人口与城市建成区面积分别为 510.59 万与 577.7 km^2[30]。已有的研究对于南京城市发展对于能量平衡[31,32]、城市热岛[33,34]，污染扩散的影响[29,35]开展，然而在复杂地形地貌条件下，城市发展对于热力环流结构的直接影响的研究尚不多见。本文拟开展南京地区城市扩张对热力环流结构影响的数值模拟及分析，理清这种复杂地形地貌特征下的局地环流以及湍流交换特征，在城市发展中合理考虑环境气象条件，不但可以防治污染及其生化灾害的形成，将环境污染减小到最低限度; 而且对于提高城市规划建设对气象条件及环境影响的评估能力，对于政府及城市规划、建设部门的科学决策，改善城市环境气象条件，提高市民生活质量，建设面向 21 世纪的现代化大都市，具有重要的意义和实用价值。

1　模式和资料

1.1　观测资料

数值模型模拟结果的验证数据主要来源于南京市气象局专业观测网中的 31 个自动站，具体地理位置详见图 2。

1.2　WRF 模式

1.2.1　WRF 模式简介

WRF 模式(weather research and forecasting model，WRF model)是新一代中尺度数值天气预报系统，同时服务于业务预报和大气研究。它具有多动力核心，三维变分数据同化系统(3-dimensional variational data assimilation system，3DVAR)，2011 年推出的 WRF V3.3 更新为 4DVAR，及允许计算并行性和系统可扩展性等特点。WRF 模式适于跨尺度从米至数千公里，应用范围非常广泛。此次模拟选取的版本为 WRF V 3.4。

1.2.2　模拟算例

本文选取 2010 年夏季 8 月 1 日 08 时至 3 日 08 时作为研究时段，该段时间南京为典型的“三伏天”，天气晴朗，主导风向为偏南气流。模拟试验采用双向反馈的三重嵌套网格(图 1)，模拟中心经纬度为 118.848°E，32.1°N，三重嵌套网格距分别为 9 km，3 km，1 km，最内层嵌套区域格点数为 211 × 247，南京主城区及周边郊区均包含在内，模拟区域及地形高度分布参见图 1 及图 2。

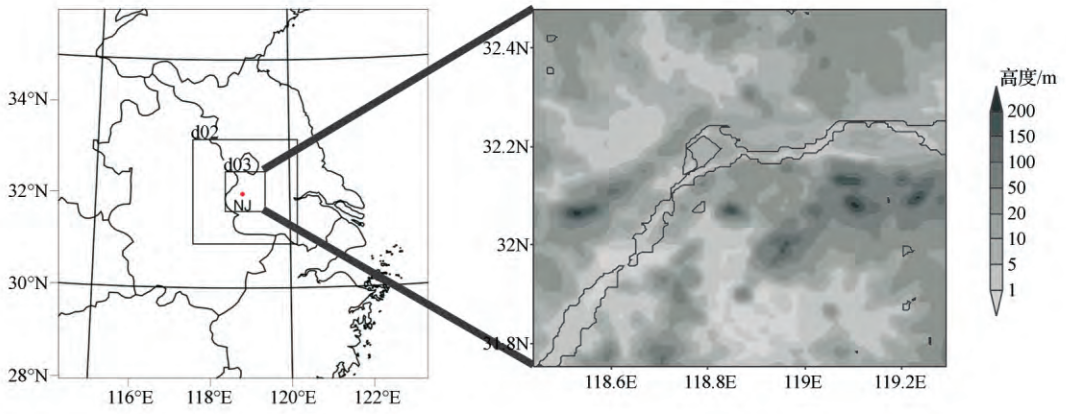
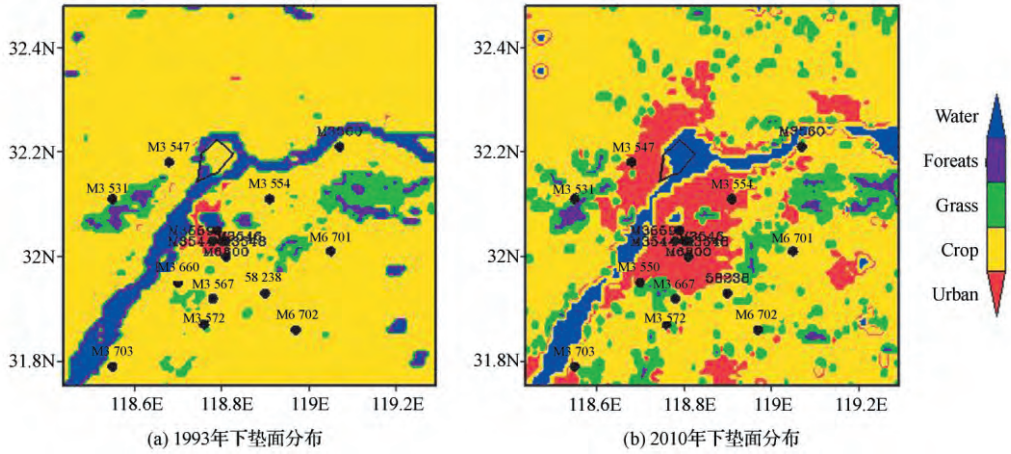


图 1　WRF 模拟区域以及最内层地形高度

Fig. 1　WRF simulation area and the innermost terrain Height

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 1993年下垫面分布 (b) 2010年下垫面分布

图 2 第三重模拟区域下垫面分布

Fig. 2 Landuse of the third layer simulation area

为了分析在相同天气背景下，城市下垫面扩张对物质输送扩散的影响。本文采用两个算例：①采用 1993 年 USGS 的模拟区域下垫面［图 2(a)］；②引入了 2001 年 MODIS 30"格点资料的土地利用类型产品代表 2010 年的 MODIS 下垫面［图 2(b)］。经统计，1993 年算例中，代表城区的格点数占整个模拟区域内格点数的 0.8%，大小为 251 km^2。2010 年算例中，代表城区的格点数占整个模拟区域格点数的 8.3%，大小为 2 610 km^2。对比两个算例，2010 年算例城区面积明显增大，是 1993 年城市下垫面的 10 倍以上。除下垫面不同外之外，两个算例中背景天气条件等皆相同。本文的模拟过程中，城市冠层参数化方案非常重要，此处选择对于中国高密城市模拟状况较好的BEP + BEM方案[36,37]。本文所选用的其它物理过程如下：RRTM 长波辐射过程、Dudhia 短波辐射过程、WSM6-class 微物理过程以及 NOAH 陆面参数化方案。由于算例的水平分辨率较高，因此仅在嵌套最外层采用 Grell 三维集成积云方案。为了取得较好的模拟结果，避免由于其他物理方案的不同而带来的额外误差，3 种冠层方案本文均采用了 BouLac 边界层方案，通过 Salamanca[38] 的研究可知 BouLac 方案对于城市冠层的模拟更好，因此，采用该边界层方案。

2 模拟结果验证

采用气象观测站的观测数据，观测资料包括逐小时气温(2 m)、相对湿度(2 m)以及风速(10 m)，对两个模拟算例结果进行评估。为了便于分析由于城市扩张对大气的影响，将观测站点按照其所在区域下垫面类型分为一直为城区站点、一直为郊区站点、由郊区发展为城区站点 3 类分别进行对比。

2.1 2 m 气温的对比

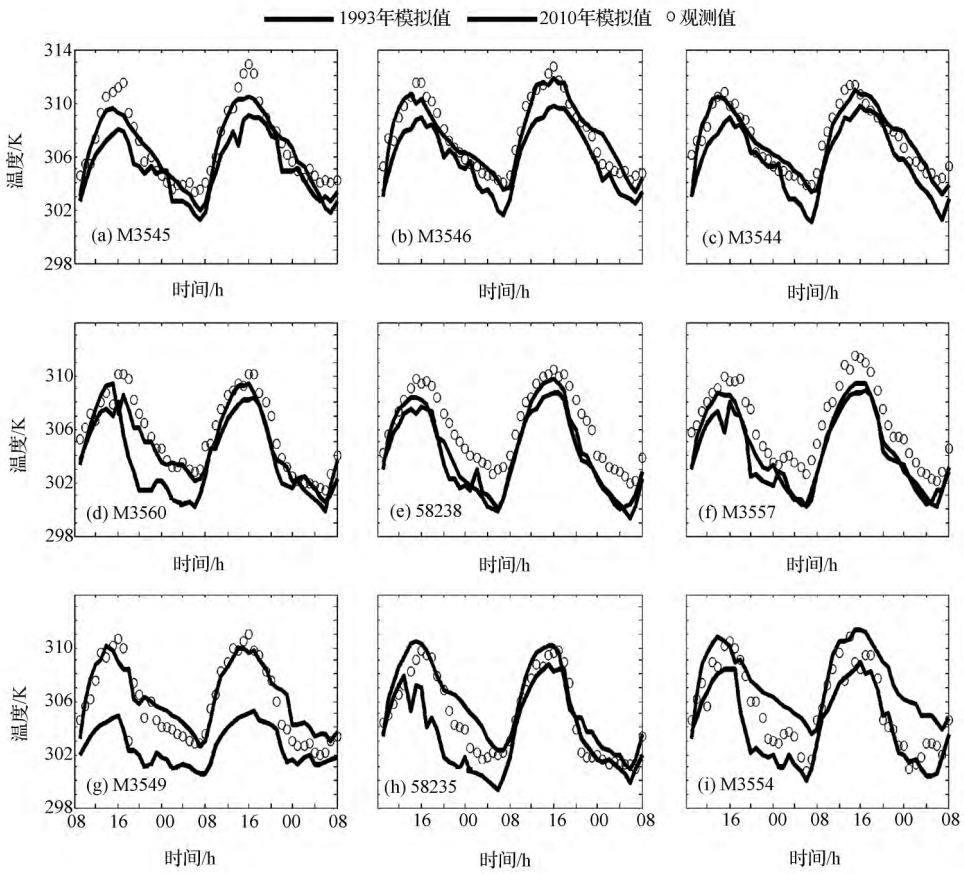
首先我们采用地面气象台站观测的 2 m 气温进行模式的验证。图 3 给出了 8 月 1 日 08 时至 8 月 3 日 08 时 2 m 气温模拟值与观测值的对比。

图 3(a) ~ 图 3(c) 中为 3 个 1993—2010 年皆处于城市下垫面的观测站，两个算例模拟 2 m 气温值与观测值的对比。由图可见，对比 1993 年与 2010 年，城区温度总体呈上升趋势，1993 年算例模拟结果普遍小于 2010 年，这与城区内本身建筑类型，交通设施等等随着城市的现代化进程不断发生着巨大变化有着紧密的联系。与观测值相比较，2010 年算例中城区的各个站点温度随时间的分布趋势大致相同，与观测较为吻合。

两个算例中一直为郊区站点 1993 年温度模拟结果与 2010 年也基本一致［图 3(d) ~ 图 3(f)］，与观测值的吻合也较好。对比 1993 年与 2010 年的模拟值，从图 3(d) ~ 图 3(f) 中可以看出，1993 年算例中，大多数站点午后降温较 2010 年算例快。造成这样结果主要是由于 2010 年算例中城区大范围扩张，使城区对热能的存储能力提升，城区范围内温度下降较郊区慢，处在城区周边的区域受到城区的影响，降温慢。

图 3(g) ~ 图 3(i) 给出了 1993 年算例中处于郊区的，但在 2010 年算例中该区域发展成为城市下垫面的 3 个站点，两个算例模拟所得 2 m 气温值与该站点观测值的对比。从图中可以看到 1993 年温度模拟值低于 2010 年，由于观测站点的下垫面由郊区发展为城区，土地利用类型完全发生了变化，建筑类型以及交通设施的改变，使得下垫面条件完全改变，温度与此同时也升高。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) ~(c) 1993—2000 年都位于城区的站点;(d) ~(f) 1993—2010 年都位于郊区的站点;
(g) ~(i) 1993 年位于郊区而 2010 年发展为城区的站点

图 3　8 月 1 日 08 时至 8 月 3 日 08 时 2 m 气温模拟值与观测值的对比

Fig. 3　The comparision between simulations and obserbations of 2 m temperature during 1 – 3 of august

2.2　2 m 相对湿度的对比

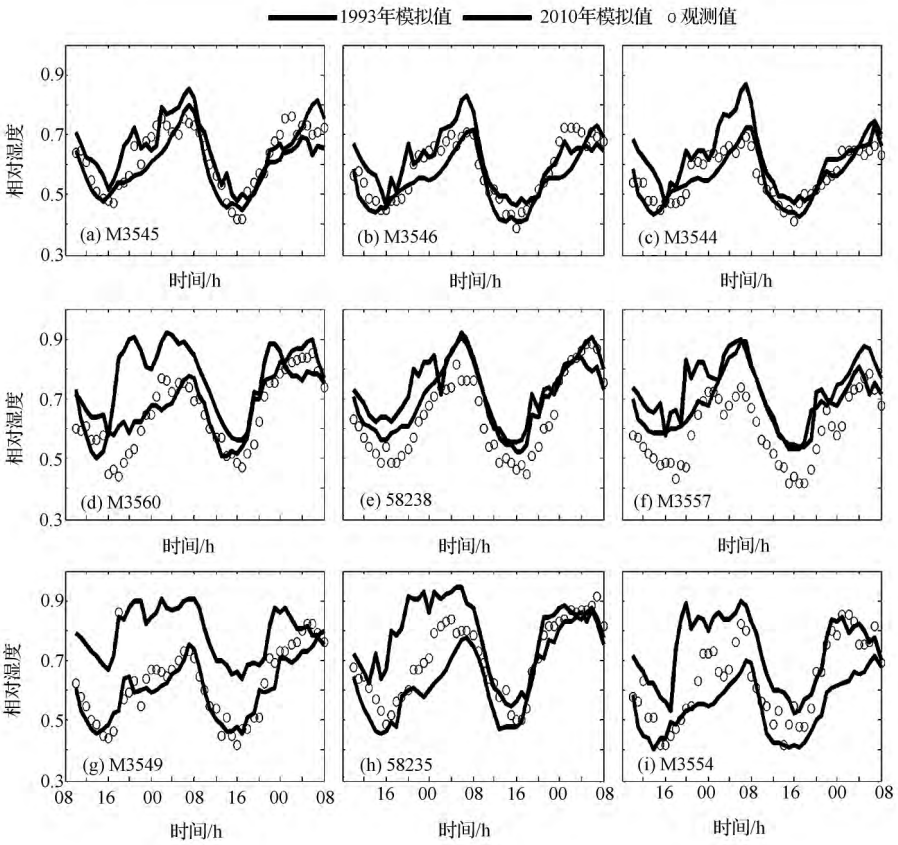
城市下垫面增加,不透水的面积扩张,对城市湿度也有很大的影响。图 4(a) ~图 4(c) 中,2010 年算例模拟 2 m 湿度普遍低于 1993 年状况。表明即使是一直处于城市下垫面,但是由于 2010 年不透水面积增加,近地层总体可蒸发的水分减少,大气中总体的湿度减小。同时,2010 年近地层气温升高,湿度有所降低。对比两组算例和观测值,2010 年算例模拟2 m相对湿度与观测值的平均相关系数 r_{xy} 为 0.87,模拟结果与实际观测较吻合,具有一定代表性。图 4(d) ~图 4(f) 为两个算例中一直是郊区站点的相对湿度模拟值与观测值的对比。从图可见,即使一直是郊区下垫面,2010 算例的湿度分布仍然大于 1993 年的湿度分布,表明由于 2010 年城市的巨大发展,对郊区的气象环境也产生了一定的影响。由郊区发展为城区站点相对湿度 2010 年模拟值低于 1993 年模拟值 [图 4(g) ~图 4(i)],2010 年算例模拟相对湿度与观测值的吻合度更好,均方根误差为 0.08,相关系数平均 r_{xy} 为 0.87。

2.3　10 m 风速的对比

图 5 为两个算例模拟所得 10 m 风速与观测的对比。由图 5 可见,与模拟算例相比较,观测的风速值整体小于模拟风速值。一直都是城区的站点,随着城市的增大,建筑物对于平均动能的拖曳及阻力变大,更多的湍流动能衰减,2010 年算例平均风速小于 1993 年 [图 5(a) ~图 5(c)]。从图 5(d) ~图 5(f) 可以看出,两算例中郊区站点风速明显大于城区风速,这与图 5(a) ~图 5(c) 共同说明了城区建筑对风速的减速效应,这也使得城区发展对城市上方污染物的水平输送能力降低。2010 年算例中由郊区发展为城区的站点风速有一定程度的降小 [图 5(g) ~图 5(i)]。

总体来看,在晴天条件下,南京市城市扩张造成的土地利用类型的改变,很大程度上改变了区域内气象要素。2 m 气温发生了显著的改变,相对湿度 2010 年较 1993 年大大降低,城区风速明显减小。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) ~(c) 1993—2000 年都位于城区的站点;(d) ~(f) 1993—2010 年都位于郊区的站点;
(g) ~(i) 1993 年位于郊区而 2010 年发展为城区的站点

图 4 模拟区域内相对湿度随时间的变化

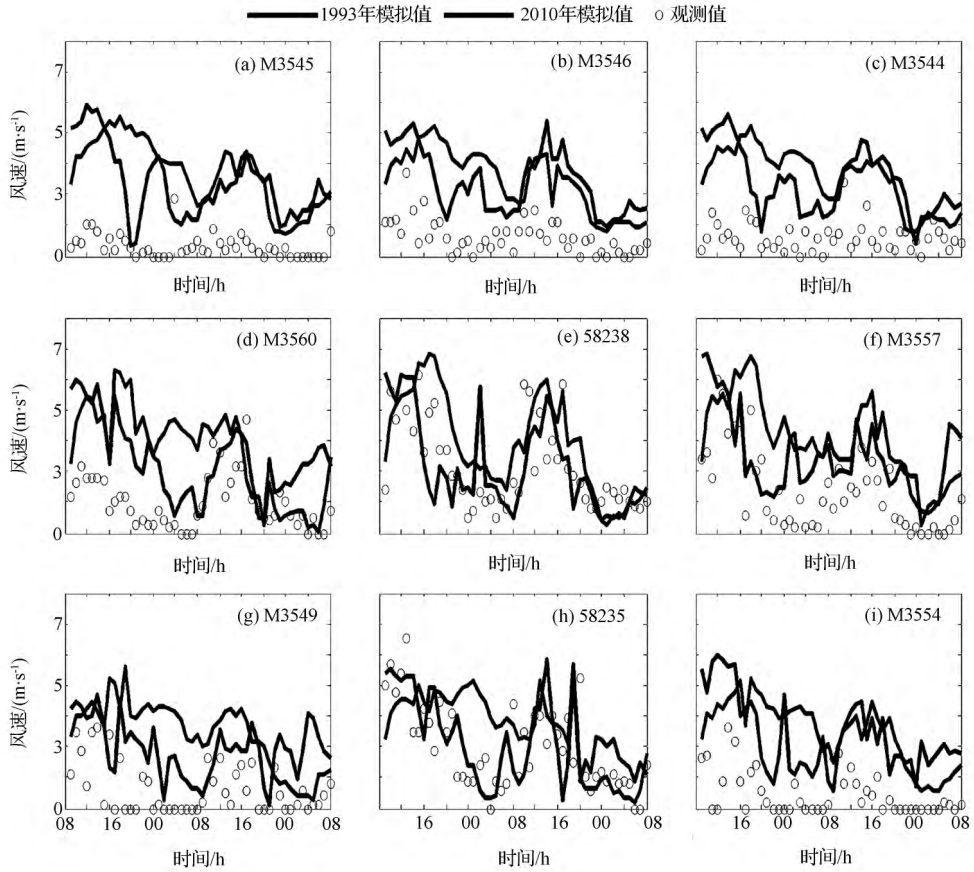
Fig. 4 The comparision between simulations and obserbations of relative humidity

表 1 各站点模拟值与 2010 年观测值之间的相关系数与均方根误差

Table 1 The correlation coefficient and root mean square error between simulations and the observations of 2010

站点		T2				Q2				U10			
		相关系数		均方根误差		相关系数		均方根误差		相关系数		均方根误差	
		1993	2010	1993	2010	1993	2010	1993	2010	1993	2010	1993	2010
城市	M3545	0.92	0.93	1.97	1.13	0.81	0.88	0.06	0.05	0.29	0.30	2.34	2.59
	M3546	0.97	0.94	1.75	0.88	0.84	0.87	0.06	0.06	0.56	0.44	1.97	2.05
	M3544	0.93	0.92	1.75	0.92	0.84	0.87	0.08	0.05	0.30	0.19	2.05	2.17
	平均值	0.94	0.93	1.82	0.97	0.83	0.87	0.07	0.05	0.38	0.31	2.12	2.27
郊区	M3560	0.86	0.95	2.41	1.15	0.55	0.87	0.16	0.07	0.47	0.31	1.82	2.23
	58238	0.95	0.97	2.25	1.98	0.84	0.96	0.11	0.08	0.57	0.72	1.40	1.35
	M3557	0.96	0.97	2.28	1.89	0.79	0.89	0.14	0.12	0.59	0.70	1.67	1.96
	平均值	0.92	0.96	2.31	1.67	0.72	0.91	0.14	0.09	0.54	0.57	1.63	1.84
郊区-城市	M3549	0.91	0.90	3.64	1.37	0.70	0.84	0.19	0.07	0.48	0.27	1.56	2.13
	58235	0.86	0.94	2.02	1.34	0.72	0.93	0.12	0.07	0.57	0.39	1.25	1.53
	M3554	0.91	0.85	1.80	2.45	0.73	0.83	0.14	0.11	0.46	0.40	2.16	2.20
	平均值	0.89	0.90	2.49	1.72	0.72	0.87	0.15	0.08	0.50	0.35	1.65	1.95

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) ~(c) 1993—2000 年都位于城区的站点;(d) ~(f) 1993—2010 年都位于郊区的站点;
(g) ~(i) 1993 年位于郊区而 2010 年发展为城区的站点

图 5　模拟区域内 10 m 风速随时间的变化

Fig. 5　The comparision between simulations and obserbations of 10 m wind speed during 1 – 3 of august

表 1 中,相关系数 r_{xy} 与均方根误差 $RMSE$ 计算公式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2}},$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(y_k - o_k)^2\right]^{1/2}。$$

3　结果分析

3.1　城市扩张对城市大气温度的影响

为了研究城市扩张对城市大气温度的影响情况,本节对比了两个算例不同时刻 2 m 气温的差值的水平分布图。图 6 中黑色实线包围的区域是 2010 年的城市区域和长江区域。对比这 3 幅温差图,可以看到,日间 09: 00、14: 00 两种方案的温度差值都比较小,大多在 1 ~3 ℃之间,而在夜间 24: 00,温度偏差明显变大,城市密集区域可达到 5 ℃左右。图 6(d) 是 2 天平均 2 m 气温的水平分布图。当土地利用由郊区改变为城市,局地有效反照率增加,导致城市地表收获的净辐射能量增加,城区有明显的增温,幅度在 1 ~2 ℃,有的区域最大增温幅度可达 4 ℃。

随着时间的演变来看,日间 09: 00 ~ 14: 00 期间,太阳短波辐射和净辐射处于最强的时间段,该阶段内两种方案模拟的近地面大气温度的差值就整个城市区域变化不大,主要的原因是,当太阳短波辐射量达到最大值,大气温度接近一天中的最大值,而下垫面的差异相对于太阳短波辐射量来说很小,因此日间不会产生很明显的影响。夜间 24: 00,城市大气温度主要受到冠层储热的作用,即与下垫面的性质关系密切,城市下垫面由于增加的人为热排放、增加的动力粗糙度,风速的减少使更多的热量留在城市。

3.2　城市扩张对局地热力环流的影响

城市下垫面发生变化,在影响近地层气象场的同时,也改变了局地热力环流的分布。为了更直观,作出温度与风速叠加的垂直剖面图进行分析。垂直剖面位于 32.05°N,参见图 2(a) 及图 2(b) ,无论在 1993

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

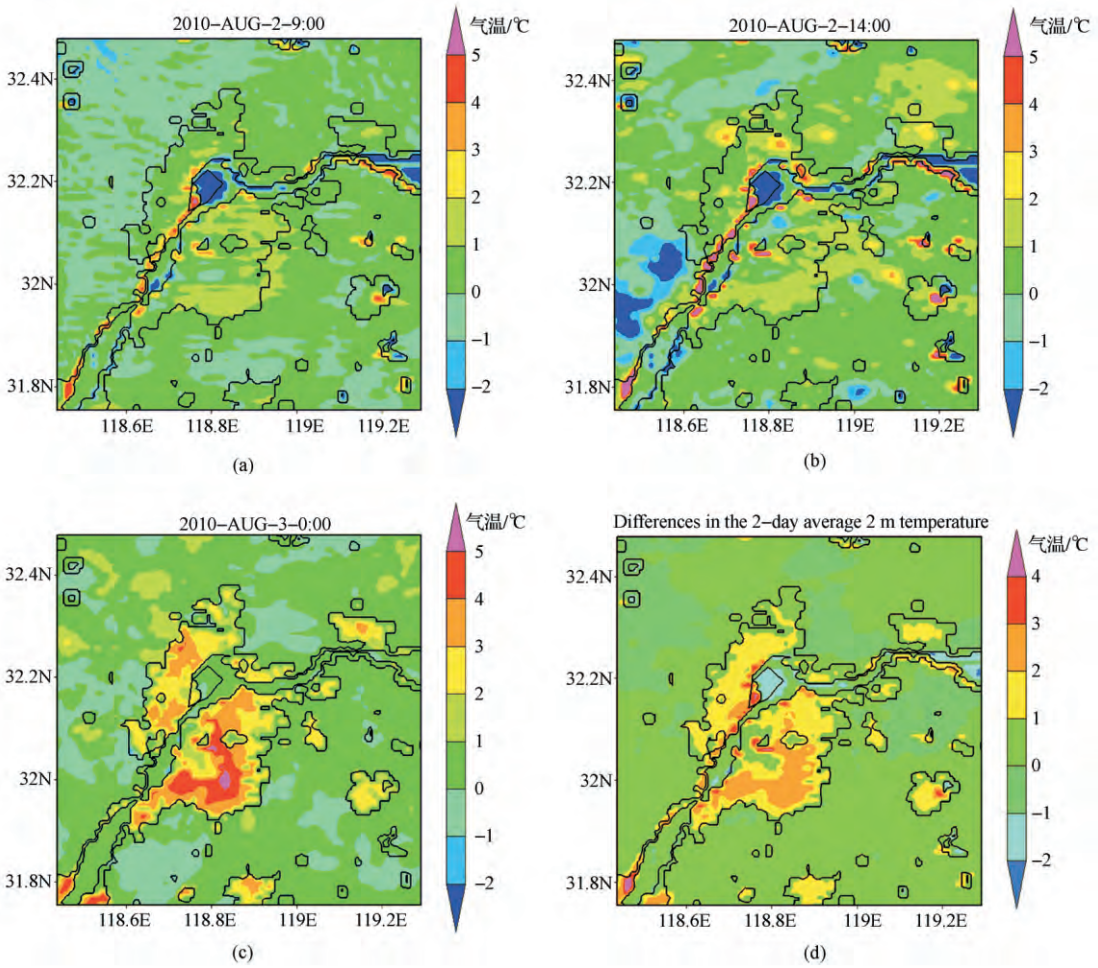


图 6 两个算例 2 m 气温的差值

Fig. 6 2 m temperature basis of two cases

年及 2010 年下垫面，该剖面都处于城市上空的位置。

图 7 为两组算例模拟的 8 月 2 日 09:00 气温和风矢量叠加的垂直剖面图。由图 7 可见，日出以后，受到太阳辐射，两算例在温度上呈现出明显差异，2010 年算例中，城区增温更快。与 1993 年算例的风场相比，2010 年算例在城区上方风速与风向表现出更明显的垂直运动。对比图 7(a)、图 7(b) 两城市的扩张，增加了城区温度与高温范围。随着地面温度的升高，城区的热岛效应不仅在水平面上产生，并且向着更高的位置发展，2010 年算例中，城市区域的高温与 1993 年相比较，高温区域抬高了约 100 m。

由图可看出，时值午后，城区温度达到最大值，地表强的湍流混合使得在温度的垂直分布上 1993 年算例和 2010 年算例基本相似。两图的差异表现在城市最大温度和城郊温差，1993 年算例城市最大温度约为 307K，而 2010 年算例最大温度达到 309 K，1993 年算例中城市影响的范围非常小。两算例风场基本相似，由于 2010 年城区范围较 1993 年有了较大的增加，城区上方出现了明显的大气垂直运动，范围较 1993 年扩大。

从图 9 夜间 24:00 温度场与风场的垂直分布看，两算例出现较大差异，1993 年算例城郊温差约为 3 K，2010 年算例约为 4 K。2010 年城市高温对周边区域产生明显的影响，使得附近 20 ~ 30 公里范围内温度升高 1 ~ 2 K，影响高度达到 300 m 高度。城郊温差增加，近地层 2010 年夜间模拟情况中城区范围内气流的辐合运动较 93 年有所增强，2010 年算例气流辐合区域高度比 1993 年升高 100 m 左右。

3.3 城市扩张对城市热岛强度的影响

热岛强度的普遍定义是城市热岛中心的气温与郊区的气温差值。由于城市覆盖地形的复杂多样，不同的测点都可能存在各自不同的城市下垫面特征，因此，取面积平均的做法可以较好反映区域气温特征。以 1993 年城区的面积平均记为城市气温，以 10 年郊区的面积平均记为郊区气温，以求得热岛强度。图 10 为两天的平均热岛强度的日变化图。可以看到两个算例中模拟得到的热岛强度的日变化趋

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

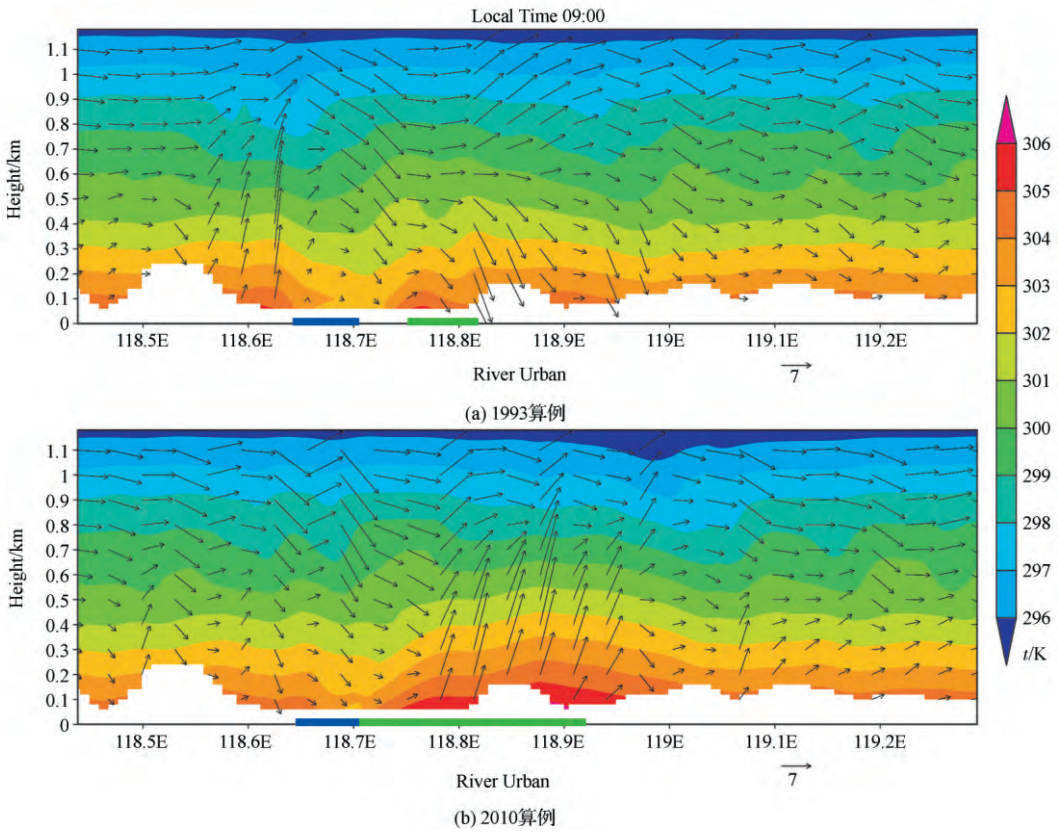


图 7　模拟区域内位于 32.05°N8 月 2 日 9:00 温度场和风场模拟结果的垂直剖面分布

Fig. 7　The vertical profile distribution of temperature and wind situated 32.05°N at 9am on August 2

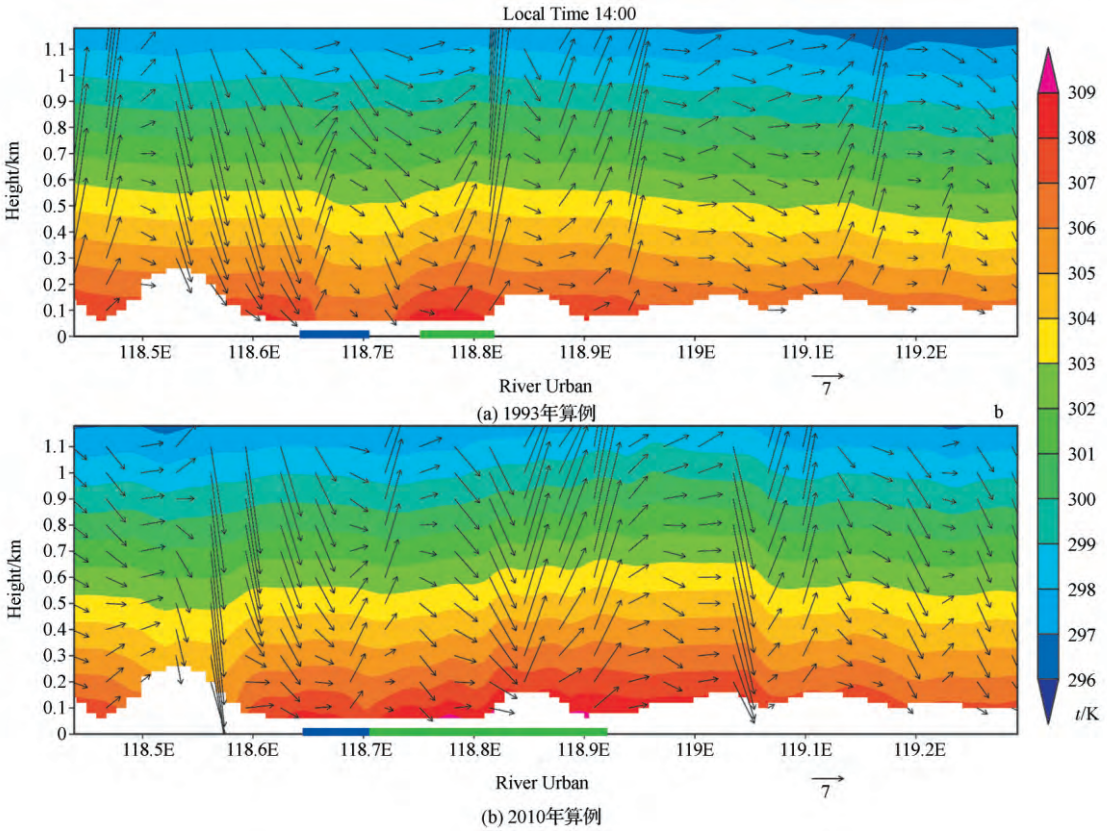


图 8　模拟区域内位于 32.05°N8 月 2 日 14:00 温度场和风场模拟结果的垂直剖面分布

Fig. 8　The vertical profile distribution of temperature and wind situated 32.05°N at 14 pm on August 2

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

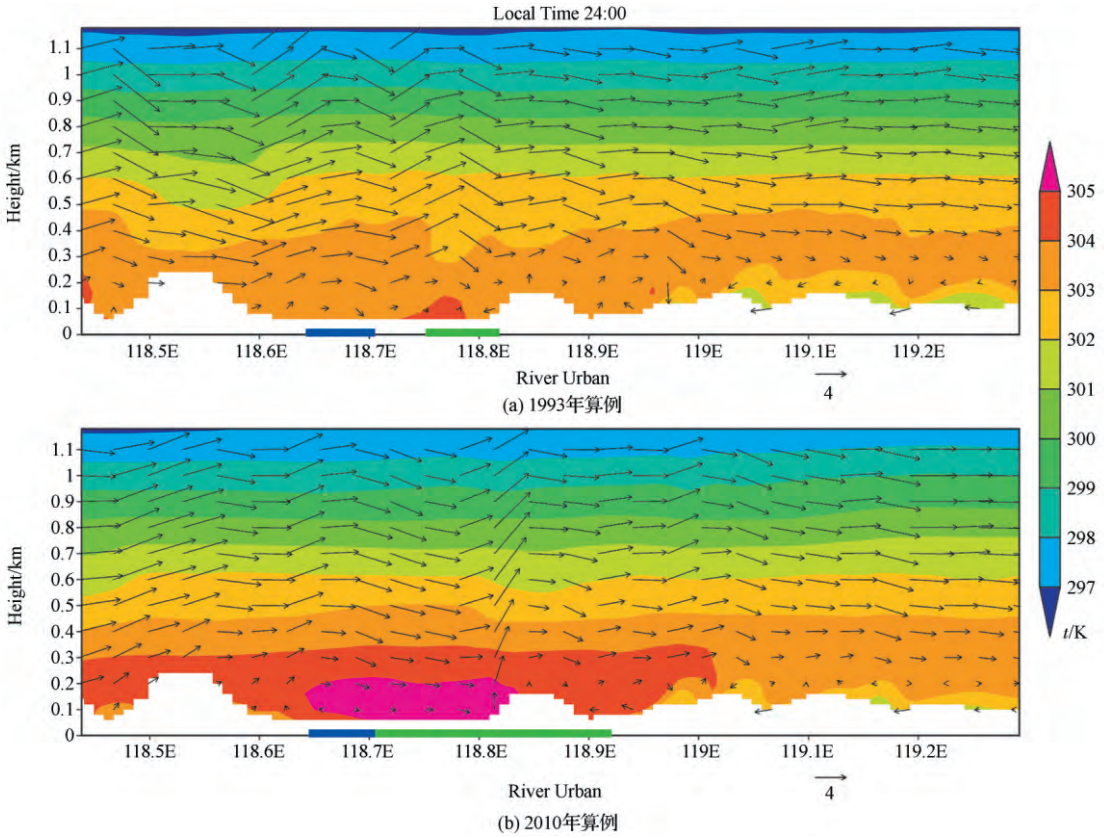


图 9 模拟区域内位于 32.05°N8 月 2 日 24:00 温度场和风场模拟结果的垂直剖面分布

Fig. 9 The Vertical Profile Distribution of Temperature and Wind Situated 32.05°N at 24pm on August 2

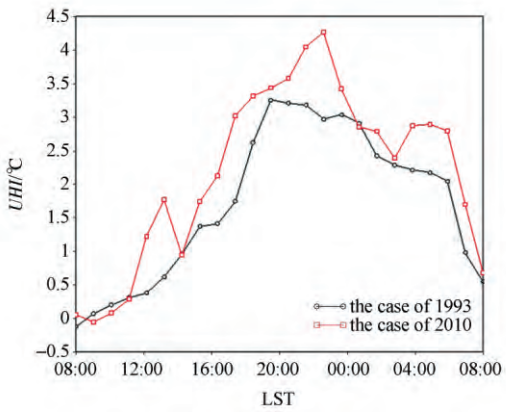


图 10 两个算例城市热岛强度 2 d 的平均日变化特征

Fig. 10 Diurnal variation of the 2 d average UHI intensity of two cases

势相似。日出时分是热岛强度的低谷，在 0 ℃左右，从 17:00 开始增加迅速至 20:00，然后略有下降直至 06:00，接着迅速下降。两个算例的城市热岛强度的日均值分别为 1.70 ℃和 2.17 ℃，表明城市扩张使得城郊的温差增大。

3.4 城市扩张对边界层高度变化及湍流扩散的影响

城市下垫面的扩张改变了局地热力环流的分布，同时对边界层高度也产生明显的影响。图 11 为不同时刻城市上方的平均位温廓线。可以看到两个算例基本能模拟出边界层高度的变化趋势。8 月 1 日 15:00 辐射对地面的供热过程减弱，地表温度开始下降，但仍能保持对大气边界层的供热，因而混合层的厚度基本上维持在中午时分的高度。太阳短波辐射被城市冠层所吸收，300 m 以下形成不稳定层结。19:00 稳定边界层发展初期，入夜后，地面净辐射转变成负值，下垫面冷却。夜间 05:00 稳定边界层的发展比白天混合层的发展要弱很多，厚度也由日间 1.2 km 减少为 0.8 km。此时，400 m 以下的位温递减率由 1993 年算例的 0.8 ℃/100 m 减为 2010 年算例的 0.375 ℃/100 m，原因是由于城市化导致的近地面温度增加。8 月 2 日 09:00 和 11:00 表示日出之后，混合层的发展又将重新开始，随着太阳辐射的加强，两算例混合层高度的差距逐渐明显。城市发展，下垫面发生变化后，城市的湍能作用加强，混合层高度升高，各种能量及物质的混合作用加强，随高度的分布更加均匀。

城市下垫面的扩张同时对湍流动能也产生明显的影响。早上 9:00，随着太阳辐射的增强，城市区域地表向上的热力湍能开始发展，城市面积越大，由

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

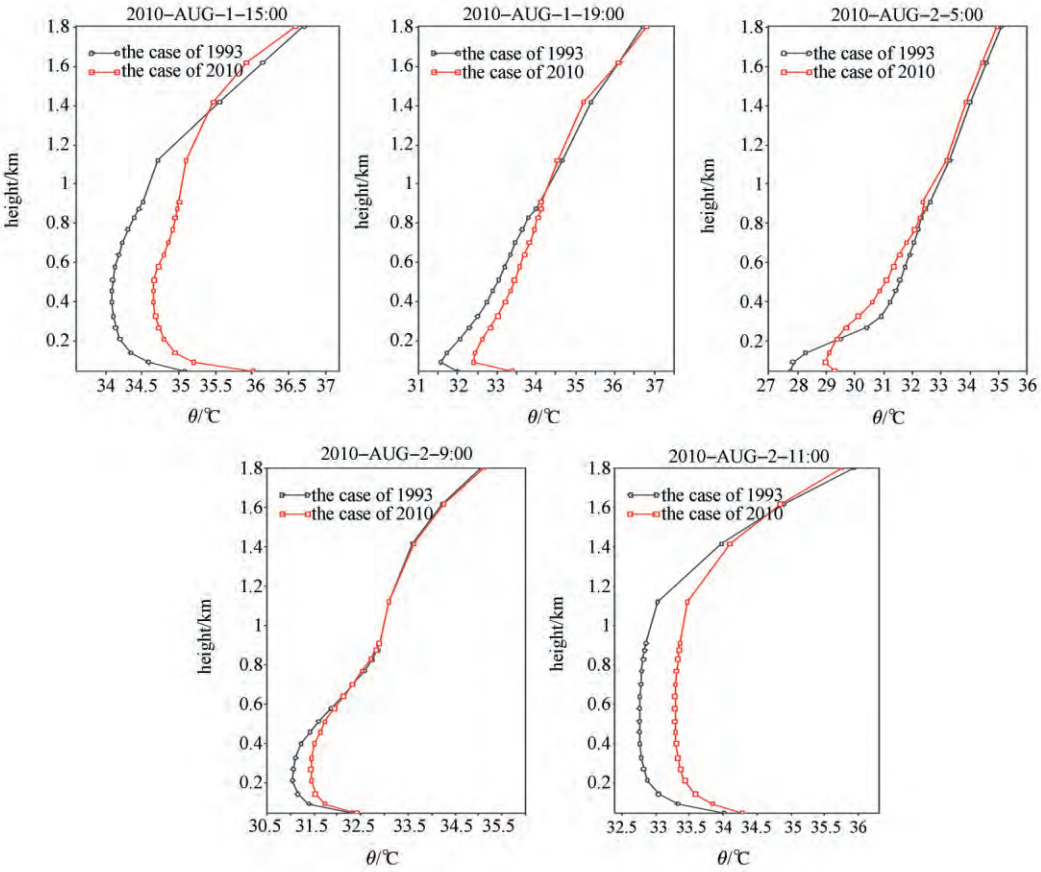


图 11　两个算例模拟所得位温廓线的对比图

Fig. 11　Potential temperature profiles of two cases

之前的温度变化分析可见,近地层气温越高,则生成的热力湍流越大。同时,城市面积越大,对于平均运动的动力摩擦越强,则由平均动能转换的机械湍能也越多。图 12 为 09:00 沿着纬度 32.05°N 上的湍流动能垂直剖面图。由图可见,上午 9:00 城区范围内湍流动能 TKE 最大值在 1993 年算例仅为 0.5 $m^2 \cdot s^2$,而 2010 算例中达到 1.2 $m^2 \cdot s^2$,影响高度也比 1993 年增加 300 m。

中午 13:00(图 13) 地表辐射热量达到最大值,近地层温度也最高,热力产生湍流动能明显增强,1993 年和 2010 年城区区域湍流动能都发展到近 1.4 km 的高度,2010 年湍流强度明显大于 1993 年,1993 年城区湍流动能最大值仅为 2.1 $m^2 \cdot s^2$,2010 年城区湍流动能最大值为 2.7 $m^2 \cdot s^2$。城市区域的扩张不仅仅影响了局地的湍流分布,使得周边区域的湍流分布有所变化,当天南京地区吹偏西风,城市扩张后,2010 年算例中,城市下风方的湍流动能增加约 0.3 $m^2 \cdot s^2$。

夜间,当地表对大气无强的热源释放时,湍流动能逐渐减小,然而从图 11 的气温分布可以看出,2010 年算例中城市地表仍然呈现明显的高温,而

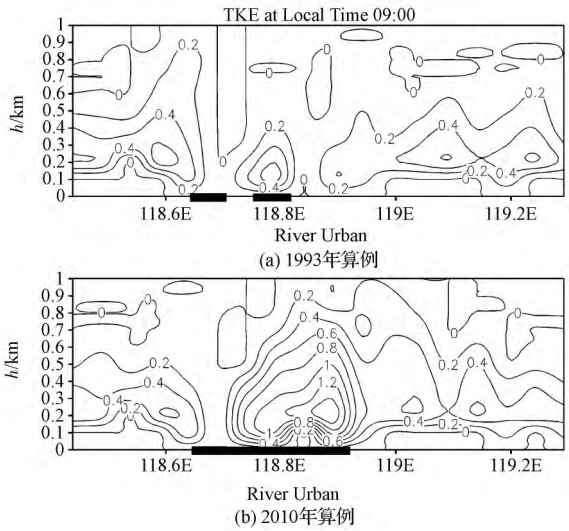


图 12　模拟区域内位于 32.05°N8 月 2 日 9:00TKE 的垂直分布(单位: $m^2 \cdot s^2$)

Fig. 12　The vertical distribution of TKE situated 32.05°N at 9am on August 2(unit: $m^2 \cdot s^2$)

1993 年算例中城市区域的高温不明显,从而导致 1993 年算例和 2010 年算例中夜间湍流动能的差异

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

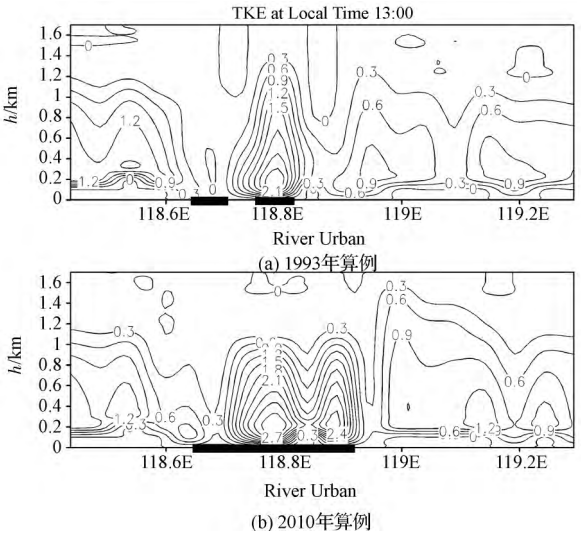


图 13 模拟区域内位于 32.05°N8 月 2 日 13:00TKE 的垂直分布(单位: $m^2 \cdot s^2$)

Fig. 13 The vertical distribution of TKE situated 32.05°N at 13pm on August 2(unit: $m^2 \cdot s^2$)

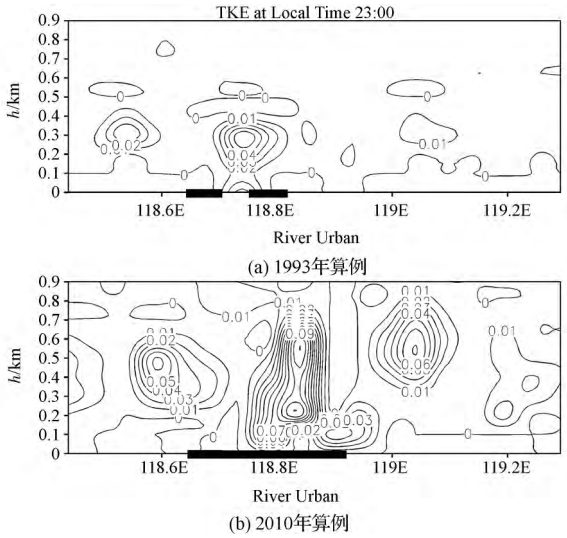


图 14 模拟区域内位于 32.05°N8 月 2 日 23:00TKE 的垂直分布(单位: $m^2 \cdot s^2$)

Fig. 14 The vertical distribution of TKE situated 32.05°N at 23pm on August 2(unit: $m^2 \cdot s^2$)

更为明显(图 14)。1993 年城区最大值仅为 0.04 $m^2 \cdot s^2$,2010 年算例明显增加,最大值约为 0.09 $m^2 \cdot s^2$。同时湍流动能的影响高度也增加了近 400 m,周边湍流强度也有所增加。

4 结论及讨论

南京地区在过去的 20 年的时间内城市化进程发展快速,大面积的郊区用地转化为城市用地,本文的研究模拟区域内,1993 年下垫面分布与 2010 下垫面分布对比,1993 年模拟区域内南京城区面积约为 251 km^2;2010 年算例中城区面积已发展到 2 610 km^2。为了量化分析下垫面的迅速扩张对城市局地热力环流的影响,本文采用 2010 年夏季晴天为背景天气条件,采用 WRF 天气数值模式,设置 1993 年下垫面和 2010 年下垫面的两组数值算例进行气象环境及湍流交换的模拟,得出以下主要结论:

(1) 数值模型中下垫面数据的准确运用对于近地层气象场的模拟有较大的影响。本文分下垫面类型一直为城市的站点,下垫面类型一直为郊区的站点以及 1993 年算例中下垫面郊区,至 2010 年下垫面发展为城区的站点 3 类进行了近地层气象条件观测值与模拟值的对比。结果表明,2010 年下垫面算例中,2 m 气温,2 m 相对湿度的模拟效果好于 1993 年下垫面,尤其在下垫面发生了显著变化的站点,模拟效果有明显的改进,对于气温和湿度的改进尤其明显,其中 2 m 气温 2010 年算例模拟值与观测值的均方根误差为 1.72 K,而 1993 年算例为 2.49 K。从而说明了在模型中采用真实的合理的下垫面对于近地层气象场的模拟效果有明显的改进。10 m 风速观测值与模拟结果对比表明,两个算例的模拟值均高于观测值,这与模型分辨率及次网格尺度参数化方案不能显式分辨网格内的建筑物等粗糙元有一定关系。

(2) 城市扩张使得局地热力环流出现了明显的变化,这种变化在白天主要表现为近地层温度的明显升高,对比两种下垫面情况,正午时,2010 年下垫面算例比 1993 年算例城市中心 2 m 气温升高近 2 K。夜间 2010 年算例城郊温差更加明显,高达 3 K,城区气流的辐合更加明显,垂直运动的高度从 1993 年的 400 m 左右升高到 2010 年的 800 m 左右。

(3) 随着城市下垫面的扩大,大气运动动能的分配有明显的变化,2010 年算例,城市区域平均风速减小,湍流动能增加。且不仅城市区域上空的湍流动能存在明显的变化,附近郊区的湍流动能也有所增强。2010 年城区范围内湍流动能整体上较 1993 年有了大幅度的增加,且随着城区范围的扩张,湍流动能大值区也随之扩大,这种变化在湍流动能本身较弱的清晨及夜间更为明显。由此表明随着城市的扩张,城区上方大气的垂直运动也随之增强,即污染物等标量物质在城区上方的垂直方向上的运动增强,而向下风向输送的作用明显减弱,这种作用在夜间,边界层高度较矮时,对于局地污染物的输送尤为不利。

(4) 本文仅就南京 2010 年 8 月的一个晴天个

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

例进行了初步的研究，并且仅就下垫面的变化进行了敏感试验，更广泛的区域，更多不同的天气状况，城市下垫面带来的局地气候变化，热力环流特征，以及进一步对于空气污染的影响需要长期的更加深入的研究。

参 考 文 献

1 世行报告提供新数据帮助确保城市增长造福贫困人口．国际融资，2015; (03): 68
WB report supported new data to ensure city growth and benefit the poor population. International Financing, 2015; (03): 68

2 轩春怡．城市水体布局变化对局地大气环境的影响效应研究．兰州: 兰州大学，2011
Xuan C Y. Impact of water distribution on the atmospheric environment in urban area. Lanzhou: Lanzhou University, 2011

3 郭娅琦．城市化进程对城市生态环境的影响研究．长沙: 湖南大学，2007
Guo Y Q. Impact analysis of urbanization process on the urban eco-environment. Changsha: Hunan University, 2007

4 Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, *et al*. Global change and the ecology of cities. Science, 2008; 319(5864): 756—760

5 Hockstad L, Cook B. Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks 1990—2009. Washington: US Environmental Protection Agency, 2006

6 Allwine K J, Shinn J H, Streit G E, *et al*. Overview of URBAN 2000: a multiscale field study of dispersion through an urban environment. Bull Amer Meteor Soc, 2010; 83(4): 521—536

7 Peterson T C, Owen T W. Urban heat island assessment: metadata are important. Journal of Climate, 2005; 18(14): 2637—2646

8 Mahmood R, Pielke R A, Hubbard K G, *et al*. Land cover changes and theirbio geophysical effects on climate. International journal of climatology, 2014; 34(4): 929—953

9 Pielke R A. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall. Reviews of Geophysics, 2001; 39(2): 151—177

10 Weaver C P, Avissar R. Atmospheric disturbances caused by human modification of the landscape. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001; 82(2): 269—281

11 刘　振，潘益农，张润森，等．环太湖地区土地利用变化的局地气候效应．气象科学，2013; 33(6): 619—626
Liu Z, Pan Y N, Zhang R S, *et al*. Local climate response to land use change in Taihu lake area. Journal of the Meteorological Sciences, 2013; 33(6): 619—626

12 詹杰民，唐　灵，李毓湘，等．土地利用城市化对珠三角炎热天气的影响．气象科学，2011; 31(3): 305—312
Zhan J M, Tang L, Li Y X, *et al*. Impact of land use changes after urbanization on meso-scale simulation of a hot episode in Pearl River Delta. Journal of the Meteorological Sciences, 2011; 31(3): 305—312

13 Ojima T. Changing Tokyo Metropolitan area and its heat island model. Energy & Buildings, 1990; 15(90): 191—203

14 Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. Nature, 2003; 423(6939): 528—531

15 杨健博，刘红年，费　松，等．太湖湖陆风背景下的苏州城市化对城市热岛特征的影响．气象科学，2013; 33(5): 473—484
Yang J B, Liu H N, Fei S, *et al*. The impact of urbanization on the urban heat island in Suzhou under the influence of Taihu lake-land breeze. Journal of the Meteorological Sciences, 2013; 33(5): 473—484

16 司　鹏，李庆祥，李　伟，等．城市化对深圳气温变化的贡献．大气科学学报，2010; 33(1): 110—116
Si P, Li Q X, Li W, *et al*. Urbanization-induced surface air temperature change inShenzhen. Transactions of Atmospheric Sci, 2010; 33(1): 110—116

17 倪敏莉，申双和，张佳华．长江三角洲城市群热环境研究．大气科学学报，2009; 32(5): 711—715
Ni M L, Shen S H, Zhang J H. A study on thermal environment of urban group in Yangtze River delta. Transactions of Atmospheric Sci, 2009; 32(5): 711—715

18 Civerolo K, Hogrefe C, Lynn B, *et al*. Estimating the effects of increased urbanization on surface meteorology and ozone concentrations in the New York City metropolitan region. Atmospheric Environment, 2007; 41(9): 1803—1818

19 王咏薇，蒋维楣．城市化进程对气象环境影响的数值研究. 中国气象学会年会. 广州: 中国气象学会，2007: 630—639
Wang Y W, Jiang W M. Numerical study on the impact of urbanization on meteorological environment. The Chinese Meteorological Society Annual Meeting, Guangzhou, The Chinese Meteorological Society, 2007: 630—639

20 解以扬，由立宏，刘学军．城市化对地表粗糙度影响的分析. 中国气象学会年会. 北京: 中国气象学会，2003: 166—168
Xie Y Y, You L H, Liu X J. Analysis of the impact of urbanization on the surface roughness. The Chinese Meteorological Society Annual Meeting. Beijing: The Chinese Meteorological Society, 2003: 166—168

21 周淑贞，余碧霞．上海城市对风速的影响．华东师范大学学报(自然科学版)，1988; 03: 104—105
Zhou S Z, Yu B X. Shanghai urban influences on wind velocity. Journal of East China Normal University: Natural Science. 1998; 03: 104—105

22 Matei G, Morefield P E, Bierwagen B G, *et al*. Urban adaptation can roll back warming of emerging megapolitan regions. Proc Natl Acad Sci USA, 2014; 111(8): 2909—2914

23 刘学军，吴丹朱．城市建筑群对低层大气风速廓线影响的统计分析．气象，1991; 17(7): 14—18
Liu X J, Wu D Z. The statistical analysis on the mean wind profiles in lower atmospheric layer effected by the urban buildings. Meteorological Monthly, 1991; 17(7): 14—18

24 Lo J C F, Lau A K H, Fung J C H, *et al*. Investigation of enhanced cross-city transport and trapping of air pollutants by coastal and urban land-sea breeze circulations. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006; 111(D14): 3085—3098

25 Romero H, Ihl M, Rivera A, *et al*. Rapid urban growth, land-use changes and air pollution in Santiago, Chile. Atmospheric Environment, 1999; 33(24): 4039—4047

26 陈　燕，蒋维楣，郭文利，等．珠江三角洲地区城市群发展对局地大气污染物扩散的影响．环境科学学报，2005; 25(5): 700—710
Chen Y, Jiang W M, Guo W L, *et al*. Study on the effect of the city

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

group development in Pearle River Delta on local air pollutant dispersion by numerical modeling. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005; 25(5):700—710

27 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 Y W, Jiang W M, Guo W L, *et al*. Numerical studying of the urban scale and layout effect on atmospheric environment. Chinese Journal of Geophysics, 2008; 51(1):88—100

28 Civerolo K L, Sistla G, Rao S T, *et al*. The effects of land use in meteorological modeling: implications for assessment of future air quality scenarios. Atmospheric Environment, 2000, 34(10): 1615—1621

29 王学远，蒋维楣，刘红年，等. 南京市重点工业源对城市空气质量影响的数值模拟. 环境科学研究，2007; 20(3): 33—43
Wang X Y, Jiang W M, Liu H N, *et al*. Numerical simulation study on the effect of major industrial sources in Nanjing on urban air quality. Research of Environmental Sciences, 2007; 20(3): 33—43

30 蔡彦枫. 长三角城市地区大气颗粒物与臭氧相互作用的观测和数值模拟研究. 南京: 南京大学，2012
Cai Y F. Observation and numerical modeling on the interaction between atmospheric particulate and ozone in urban area of Yangtze River Delta. Nanjing: Nanjing University, 2012

31 孙仕强，刘寿东，王咏薇，等. 城、郊能量及辐射平衡特征观测分析. 长江流域资源与环境，2013; 22(4):445—454
Sun S Q, Liu S D, Wang Y W, *et al*. Characteristics analysis of radiation and energy budget over urban and suburban. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2013; 22(4):445—454

32 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 W M, Wang Y W, Zhang N. Research on urban land-surface process and boundary layer structure. Advances in Earth Science, 2009; 24(4):411—419

33 刘红年，蒋维楣，孙鉴泞，等. 南京城市边界层微气象特征观测与分析. 南京大学学报(自然科学版)，2008; 44(1):99—106
Liu H N, Jiang W M, Sun J N, *et al*. An observation and analysis of the micrometeorological characteristics of the Nanjing urban boundary layer, eastern China. Journal of Nanjing University, 2008; 44(1):99—106

34 吴 昊，王体健，方 欢，等. 南京细颗粒物对城市热岛强度的影响. 大气科学学报，2014; 37(4):425—431
Wu H, Wang T J, Fang H, *et al*. Impacts of aerosol on the urban heat island intensity in Nanjing. Transactions of Atmospheric Sciences, 2014; 37(4):425—431

35 张予燕，芮冬梅，刘 军，等. 南京市重点污染源对城区空气质量的影响. 环境监测管理与技术，2009; (6):62—64
Zhang Y Y, Rui D M, Liu J, *et al*. Influence of air quality by key sources in Nanjing urban area. Administration & Technique of Environmental Monitoring, 2009; (6): 62—64

36 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 J J, Wang Y W, Zhu B, *et al*. Performance comparison of different urban canopy schemes in wrf model under Chongqing meteorological simulation. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2013; 22(12):1627—1634

37 王咏薇，伍见军，杜 钦，等. 不同城市冠层参数化方案对重庆高密度建筑物环境的数值模拟研究. 气象学报，2013; (06) 1130—1145
Wang Y W, Wu J J, Du Q, *et al*. Numerical study of the Chongqing high-density buildings environment by the WRF with the different urban canopy schemes. Acta Meteorologica Sinica, 2013; (06):1130—1145

38 Salamanca F, Martilli A. A new Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for urban climate simulations—part II. Validation with one dimension off-line simulations. Theoretical & Applied Climatology, 2010; 99(3—4): 345—356

(下转第 35 页)

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Monitoring Result Analysis of Slope Seismic Response during the Qingchuan M_S 4.0 Earthquake

YANG Shuan-cheng, WANG Yun-sheng, YANG Min, CHEN Ming
(Chengdu University of Technology State Key Laboratory of Geo-Hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu 610059, P. R. China)

[Abstract] Since the "5.12" Wenchuan earthquake, the aftershocks of Qingchuan have been continuing. The analysis was carried to the latest M_S 4.0 seismic monitoring data on September 23, 2015. Compared with the peak acceleration of each monitoring point, it is known that in the valley area, the maximum peak acceleration in the horizontal east-west direction is greater than the maximum peak acceleration in the horizontal north-south direction, while on the ridge, the maximum peak acceleration in the horizontal north-south direction is greater than the maximum peak acceleration in the horizontal east-west direction; Referring to the valley (4#) monitoring points, the horizontal PGA amplification factor of 6# monitoring points on the Dongshan ridge reached 2.0, and the vertical PGA amplification coefficient was 4.0; Spectral ratio analysis (HVSR) shows that the terrain magnification factor of the Dongshan monitoring points is maximum up to 5.6, and the most predominant frequency is between 1.5 and 3.5Hz. The research shows that the amplification effect of the terrain is obvious in the Dongshan slope under strong earthquake, and the 6# monitoring points have the most obvious amplification effect.

[Key words] seismic response monitoring of slope maximum peak acceleration topographic amplification effect spectral ratio analysis (HVSR)

(上接第 28 页)

Simulation of the Land-use Change Effect on Urban Local Thermodynamic Circulation

WANG Yong-wei[1,2,3], ZHAI Xue-fei[1,2], QI De-li[1,2], HUANG Yi[2], CHEN Lei[3]
(Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment[1], Institute of Atmospheric Physics[2], Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, P. R. China;
State Key of Laboratory of Atmospheric Boundary Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences[3], Beijing 100029, P. R. China)

[Abstract] With the acceleration of urbanization, urbanization process will inevitably lead to changes in land use types, changes in land cover occur will have a huge impact on the surface energy of the region, the air flow field characteristics, atmospheric turbulence characteristics of meteorological elements, *etc*. impact the material transport within the region of atmospheric diffusion process impact. Furthermore with the urban canopy schemes coupled to WRF model, some numerical experiments are employed to investigate the impact of land-use change on local thermodynamic circulation. The land cover of Nanjing city in 1993 and 2010 are taken as examples. The simulation results show that 2 m temperature in urban region increases from 1993 to 2010; and the addition of temperature can reach 3 K at 24:00. Results show that urbanization weakens the wind and enhances the pollutant trapping and therefore contributes to the overall poor air quality in the region. Urban heat island leads to the convergence of airflow in the lower layer of atmosphere, With more urbanized region, stronger turbulent kinetic energy (TKE), for example the maximum of TKE at noon increased from 2.1 $m^2 \cdot s^2$ to 2.7 $m^2 \cdot s^2$. Urban sprawl enhances vertical mixing and hinders horizontal downward dispersion which caused pollutants to accumulate in urban areas.

[Key words] urban sprawl WRF model land-use local thermodynamic circulation turbulent kinetic energy

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net