

董春卿, 郭媛媛, 赵桂香, 等. 太原城市下垫面扩张对边界层特征影响的个例研究[J]. 干旱气象, 2014, 32(6): 916–925, [DONG Chunqing, GUO Yuanyuan, ZHAO Guixiang, et al. A Case Study on the Effect of Urban Underlying Expansion on Atmosphere Boundary Layer Characteristics in Taiyuan[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(6):916–925], doi:10.11755/j.issn.1006–7639(2014)–06–0916

太原城市下垫面扩张对边界层特征影响的个例研究

董春卿, 郭媛媛, 赵桂香, 邱贵强

(山西省气象台, 山西 太原 030006)

摘要:通过高分辨率卫星夜间灯光数据获取最新的城市地表分布,并利用高分辨率数值模式对2013年8月14~16日太原区域的一次高温过程进行研究,探讨城市下垫面扩张对大气边界层的影响。结果表明:基于DMSP/OLS夜间灯光数据对模式中地表参数修正后,能够更准确地反映太原主城区和高速公路沿线小规模建筑群的扩张,有效改善了模式的预报性能,显著提高对近地面气温、地表温度的预报能力。城市下垫面的扩张,使城区夜间升温明显,热岛强度增强。与1992年的城市化状况相比,晴空天气条件下,2012年太原城区夜间气温上升5℃,热岛强度升高2~3℃。城市下垫面扩张,改变了地表能量分配关系,使得地表感热传输明显加强,潜热通量明显减弱,城市冠层作用下的储热能力增强。边界层内部湍流交换、水汽输送等的进一步研究表明:城市地表水汽输送减弱,边界层水汽含量减少,2~4 km高度的水汽含量增加,湍流动能的影响高度增高,湍流混合加剧;14:00,城区边界层高度抬高了800 m,城市上空混合层加深,持续时间更长。

关键词:城市化;城市热岛;夜间灯光;城市边界层

文章编号:1006–7639(2014)–06–0916–10 doi:10.11755/j.issn.1006–7639(2014)–06–0916

中图分类号:P421.3;P461.8

文献标识码:A

引言

近年来,我国大规模城镇化带来了土地利用类型的快速变化,太原作为山西省政治、经济、文化中心,城市建设面貌发生了巨大的变化。随着城市范围的扩大,原有农田、森林等自然植被不断被沥青、水泥路面以及建筑物等人造表面所代替。与城市化相伴随的城市空气质量恶化^[1]、夏季高温热浪等灾害性气象事件频发^[2~4],严重影响了城市人居环境和社会经济的可持续发展。深入研究快速城市化的直接气候效应及其形成机理,可为合理规划城市发展规模、布局,减少城市化的负面影响提供科学依据^[5~7]。

城市热岛效应(UHI)是城市典型气候特征之一,是指城市中的气温明显高于周围郊区的现象,世界上1 000多个不同规模的城市发现了UHI现象,范围遍及南、北半球的各纬度地区^[8~9]。数值模式

的发展对UHI和边界层的研究起到了极大的促进作用,借助模式可以捕捉到许多高时空分辨率的物理特征,这是目前观测手段所无法比拟的。Zhang等^[7]利用耦合的WRF–UCM模式揭示了上游城市化加剧了下游城市的热岛效应。Miao等^[8]通过敏感性试验,发现城市热岛效应会对水平对流卷涡(horizontal convective rolls)产生影响。江晓燕等^[10]利用反照率观测事实替代模式缺省的反照率参数,通过北京市热岛过程的对比试验,发现城市反照率下降0.03会引起城市热岛强度增强0.8℃左右。陈燕^[11]、王腾蛟^[12]等利用卫星遥感资料获得土地利用、地表反照率等地表参数,改进边界层模式,研究了城市化对热岛效应及大气边界层结构的影响。UHI的模式研究成果不仅有力地补充了观测分析,而且加深了对UHI物理过程的理解。

地表经由边界层与自由大气进行物质、能量与动量的交换,进而影响天气与气候,大气与地

收稿日期:2014–07–25; 改回日期:2014–08–21

基金项目:城市气象研究基金“太原城市效应与复杂地形对城市高温的影响(UMRF20121)”、中国气象局2014年度气象关键技术集成与应用面上项目“精细化空气质量预报技术应用(CMAGJ2014M09)”、山西省气象局重点课题“山西省环境空气预报数值模式研究(SXKZDTQ20140601)”共同资助

作者简介:董春卿(1984–),男,山西介休人,工程师,主要从事区域精细化天气预报相关研究。E-mail:dong.chq@gmail.com

表间的交互作用,称为地表过程。准确的土地利用信息是模式准确描述地表过程的关键基本参数之一,可以提高模式对中小尺度环流系统的预报能力。本研究利用新一代中尺度气象数值模式 WRF 耦合城市冠层模块(UCM),基于高分辨率卫星灯光数据更新的城市地表参数分布,对太原市夏季城市热岛现象进行了数值模拟。在此基础上,对比分析了相同天气背景下城市地表扩张对地面温度、城市热岛强度及边界层热力结构和湍流输送的影响,以期为城市发展的影响评估和对策制定提供科学依据。

1 天气实况

2013 年 8 月 14~16 日,山西多地出现 35 ℃以上的高温天气,16 日太原城区最高气温达到 37.2 ℃。500 hPa 高度场表明:受台风“尤特”登陆的影

响,副热带高压系统持续维持,太原上空盛行平直的偏西气流,气压梯度小,天气形势稳定,有利于城市热岛的形成(图 1)。

2 模式及试验方案设计

2.1 模式介绍

WRF(Weather Research and Forecasting Model)模式系统是由美国国家环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合开发的中尺度天气模式。该模式通过耦合 Noah 陆面过程整体调整模式网格中城区的地表参数(如反照率、粗糙度)来反映城市的影响^[13]。为了详细描述城市的热力学和动力学效应,WRF 在 Noah 陆面过程中耦合了城市冠层模块(Urban Canopy Model,简称 UCM),考虑城市的几何特性、建筑物的遮挡和对长短波辐射的反射以及路面、墙面和屋顶的热力作用^[14~18]。

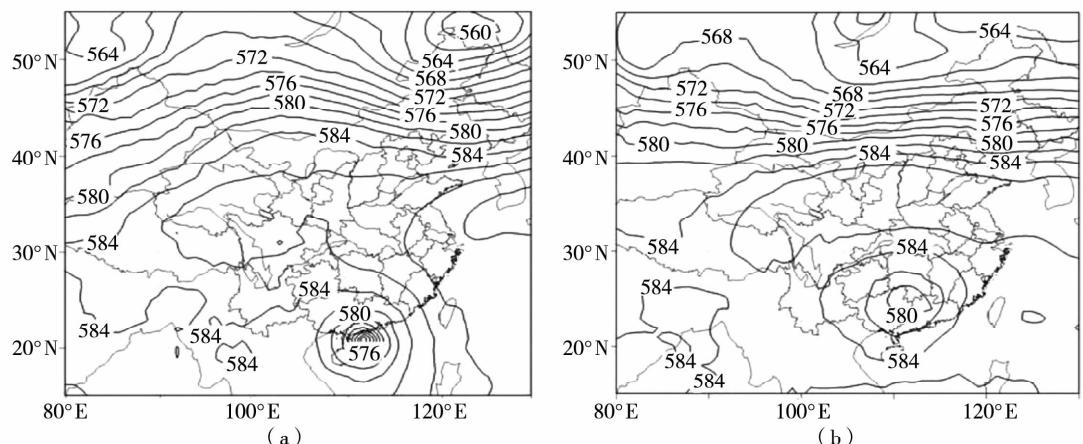


图 1 2013 年 8 月 14(a)、16(b) 日 08 时 500 hPa 位势高度场(单位:dagpm)

Fig. 1 The 500 hPa geopotential height fields at 08:00 BT

14 (a) and 16 (b) August 2013 (Unit: dagpm)

2.2 试验设计

模拟试验所采用的 WRF 模式为 3.4.1 版本。模拟试验采用了双向反馈的四重嵌套网格(图 2),模拟中心为 112.6°E,37.8°N,水平网格距分别为 27 km、9 km、3 km、1 km,格点数对应为 150×150、169×169、139×232、226×241。模式顶高 50 hPa,垂直方向为 40 层,其中 2 km 以下有 18 层,最底层为 20 m。初始场选用 2013 年 8 月 14 日 08 时至 17 日 08 时(北京时)的 NCEP/NCAR 1°×1°再分析资料,6 h 更新一次侧边界,积分时间 72 h,时间步长 120 s。模式参数化方案如表 1。同时也考虑了人为热源释放,人为热源的日均值为 50 W·m⁻²,峰值出现在 08:00 和 17:00^[19],最低值出现在夜间 04:00。

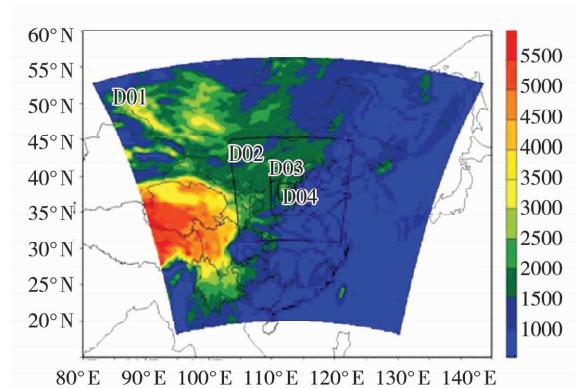


图 2 四重嵌套区域及海拔高度分布(单位:m)

Fig. 2 The distribution of nested domains and altitude (Unit:m)

表1 模式参数化方案

Tab. 1 Parameterization scheme of the Model

分辨率/km	微物理过程	积云参数化	边界层	陆面过程	长波辐射	短波辐射
27	WSM6	Grell – Devenyi	Monin – Obukhov	Noah	RRTM	Goddard
9	WSM6	Grell – Devenyi	Monin – Obukhov	Noah	RRTM	Goddard
3	WSM6	/	Monin – Obukhov	Noah	RRTM	Goddard
1	WSM6	/	Monin – Obukhov	Noah	RRTM	Goddard

合理的下垫面分类资料是模拟城市热岛现象的必要条件。模式中原有的土地覆盖/利用类型数据源于 USGS (United States Geological Survey) 提供的全球土地覆盖/利用分布, 该资料是基于 1992~1993 年 NOAA AVHRR 卫星资料推导而获得的, 已无法反映当前的土地覆盖/利用的状况。DMSP/OLS 夜间灯光数据来源于美国 NOAA 地球物理数据中心 (NOAA National Geophysical Data Center), 空

间分辨率为 30''(约 1 km), 为无云状态下平均夜间灯光强度, 数值范围 0~63, 能够探测到城市灯光甚至小规模居民地、车流等发出的低强度灯光。该数据已被广泛应用于城市化相关研究中^[20~21]。因此, 本研究针对 2013 年 8 月 14~16 日夏季典型高温过程, 结合 DMSP/OLS 夜间灯光数据, 设计了 3 组对比试验, 分析在相同天气背景下, 城市扩张对边界层气象要素的影响。图 3 为不同数据源的太原地

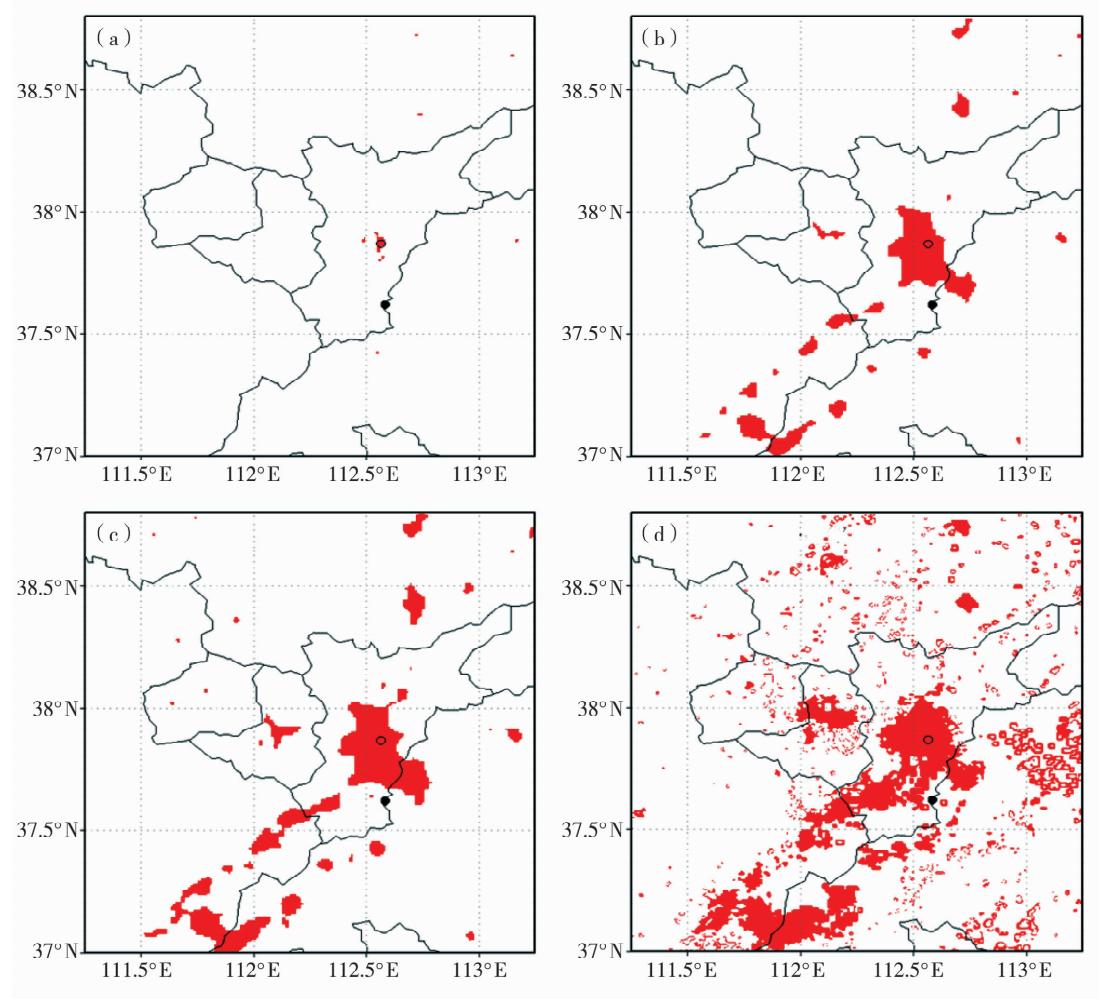


图 3 不同数据来源的太原地区城市范围(空心圆为城市站, 实心圆为乡村站)

(a) USGS1992, (b) DMSP2006, (c) DMSP2012, (d) MODIS IGBP2001

Fig. 3 The range of Taiyuan urban area from different data sources

(the hollow and solid circles denote the location of urban and rural stations, respectively)

(a) USGS1992, (b) DMSP2006, (c) DMSP2012, (d) MODIS IGBP2001

区城市范围。可以看出,1992~2012年,太原主城区向西、向南大范围扩张,太原—晋中同城化趋势加强,大运高速公路沿线小规模建筑群明显扩张。图3d为MODIS IGBP2001的城市范围,比DMSP城市范围略大。可见,基于DMSP/OLS数据对USGS1992城市地表覆盖修正后的结果,能够反映出太原城市的扩张。

设计的3组对比试验为:a,四重区域均选择了USGS 30"高分辨率的地形高度和地表类型,记为USGS试验;b,利用2006年DMSP/OLS夜间灯光数据对USGS 30"地表类型修正,记为DMSP2006试验;c,利用2012年DMSP/OLS夜间灯光数据对USGS 30"地表类型修正,记为DMSP2012试验。

3 结果分析

3.1 模式验证

3.1.1 2 m气温对比检验

为检验对照试验对此次高温天气的模拟能力,将模拟的城市、乡村代表站2 m气温与观测值进行对比(图4),模拟的2 m气温日变化特征与实测基本一致,其中城市站DMSP2012试验的2 m气温模拟与实况更为吻合,USGS试验模拟的2 m气温较实况偏低,夜间最低气温偏低更为明显;乡村

站,不同试验的2 m气温预报差异较小,预报效果基本一致。

表2给出了不同代表站模拟的2 m气温与观测值之间的标准误差统计。对于城市站,USGS试验气温与实况偏差较大,白天(预报时效0~12 h、24~36 h、48~60 h)气温偏低0.68~1.76 °C,夜间气温偏低3.8~4.1 °C,白天气温预报偏差明显小于夜间;DMSP2006试验白天气温偏差1.06~1.44 °C,夜间偏低为1.24~1.62 °C,白天气温预报偏差略小于夜间;DMSP2012试验白天气温偏差为1.09~1.43 °C,夜间为1.06~1.43 °C。3组试验城市气温模拟值与观测值的相关系数分别为0.88、0.92、0.92,表明DMSP试验模拟的城市2 m气温的精度高于USGS试验,尤其是对夜间气温的模拟。对于乡村站,不同试验的预报偏差均在1 °C左右,相关系数均为0.96,且气温预报偏差明显小于城市站,表明3组试验对乡村站2 m气温的模拟效果相当,且对乡村站的气温模拟好于城市站。因此,基于真实的城市建筑用地分布,能够显著改善模式对城市站点的气温预报性能,尤其对城市夜间气温有2 °C以上的改善。模式对白天气温预报改善不明显,这可能还与人为热源排放、植被、地表反照率等更新有关。

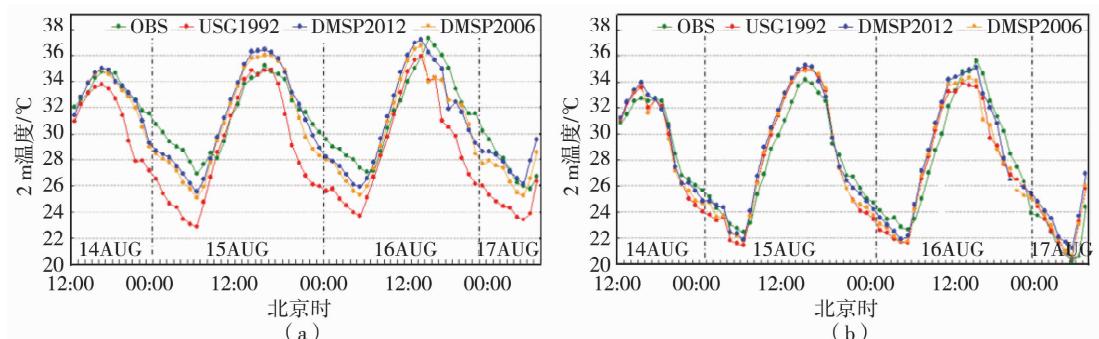


图4 2013年8月14日12时至17日00时城市站(a)和乡村站(b)
不同试验方案2 m气温预报值与实况对比

Fig. 4 Diurnal variations of observed and simulated 2 m temperature
in urban (a) and rural (b) stations from 12:00 August 14 to 00:00 August 17, 2013

表2 2m气温模拟与观测值的标准误差统计(单位:°C)

Tab. 2 Comparison between the observed and simulated
temperatures at 2 m height for urban and rural stations (Unit: °C)

模式	地区	标准误差						相关系数
		0~12 h	12~24 h	24~36 h	36~48 h	48~60 h	60~72 h	
USGS1992		1.76	4.10	0.68	3.80	1.55	3.38	0.88
DMSP2006	城市	1.06	1.62	1.16	1.56	1.44	1.24	0.92
DMSP2012		1.09	1.25	1.38	1.06	1.43	0.07	0.92
USGS1992		0.73	1.05	1.15	1.26	1.54	0.98	0.96
DMSP2006	乡村	0.86	0.74	1.23	1.07	1.65	1.14	0.96
DMSP2012		0.76	0.62	1.36	0.66	1.25	1.45	0.96

3.1.2 地表温度对比检验

通过与 MODIS 卫星反演结果对比,分析 3 组试验对地表温度的模拟能力。图 5a 为 15 日 11:58(北京时)MODIS 卫星反演的太原地区地表温度分布,其分辨率为 1 km,可以看到太原中心城区地表温度达 316 K,城市—乡村的地表温度相差 8~10 K,且沿着大运高速带也有显著的热岛效应。USGS1992 试验模拟的地表温度分布(图 5b)显示,城区地表温度为 312 K,城乡温差为 2 K,UHI 强度

较 MODIS 卫星反演结果偏低,范围偏小,且高速公路带沿线无明显的热岛现象。图 5c、图 5d 分别为 DMSP2006、DMSP2012 试验模拟的地表温度分布,可以看出城市范围有明显的热岛效应,中心城区地表温度达 314 K,城市与乡村的地表温差为 6~8 K,且 DMSP2012 试验模拟的 UHI 范围和强度更接近于 MODIS 反演的结果。另外,3 组试验模拟的太原以南盆地的地表温度均较 MODIS 卫星反演结果偏高,这可能与模式选取的参数化方案有关。

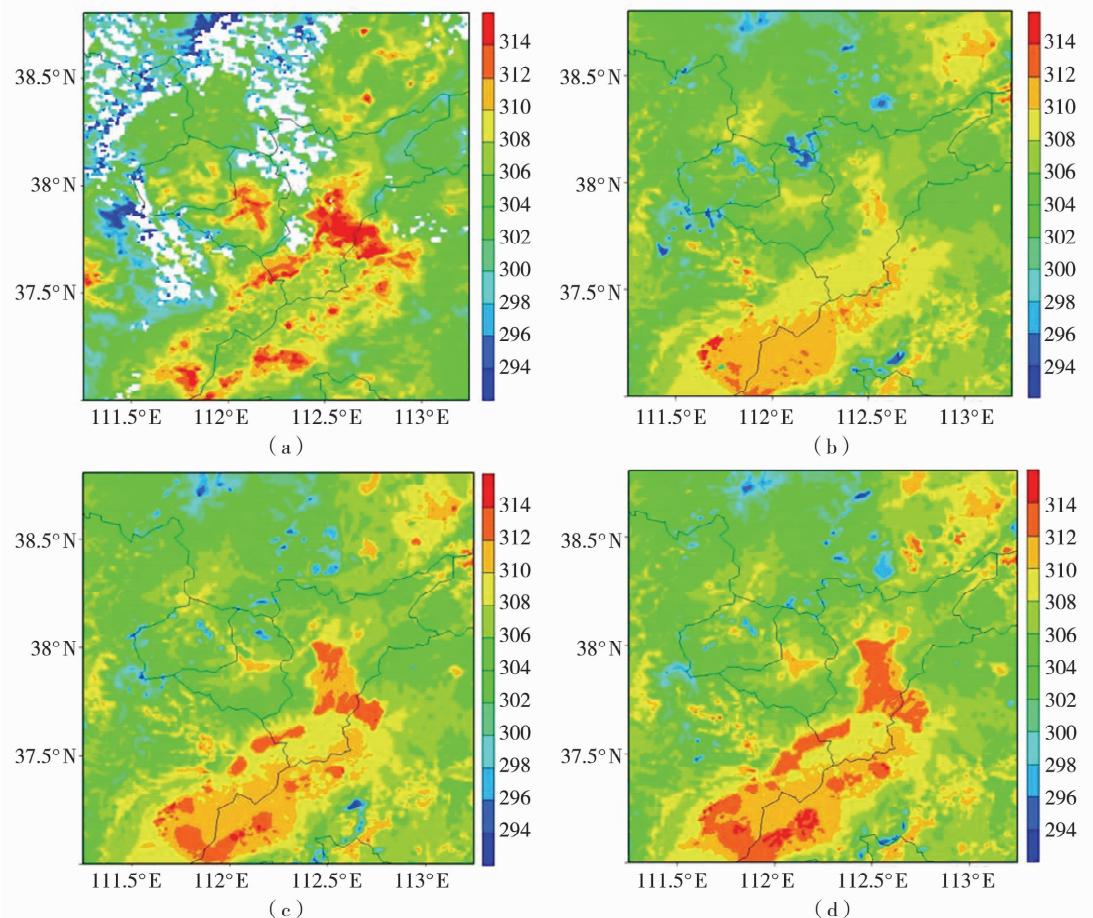


图 5 2013 年 8 月 15 日 11:58 地表温度分布(单位:K)

(a) MODIS,(b) USGS1992,(c) DMSP2006,(d) DMSP2012

Fig. 5 The spatial distribution of skin temperature at 11:58 BT 15 August 2013 (Unit:K)

(a) MODIS, (b) USGS1992, (c) DMSP2006, (d) DMSP2012

总体来说,3 组地表参数方案中的 DMSP2012 模拟的温度结果与实况更接近,对于夜间 2 m 气温、地表温度的模拟有较大改善。这表明地表类型是模式中重要的地表特征参数之一,对温度场的预报十分重要。同时也说明,利用高分辨率卫星遥感资料获得地表参数是改进数值模式的一种可行手段,将其应用到城市边界层结构的研究中,可以显著提高模式的模拟性能,有助于深入了解城市边界层内部

湍流发展、水汽输送等更为真实的发展变化。

3.1.3 UHI 强度对比检验

城市热岛强度定义为城市气温差 ΔT ,其表达式如下:

$$\Delta T = T_u - T_r \quad (1)$$

式(1)中, T_u 、 T_r 分别为城市、乡村站 2 m 的气温。这里选取新建路站作为城市代表站,山西省观象台站作为乡村代表站,其测站相关信息如表 3。

表3 太原市城乡观测站相关信息

Tab. 3 The information of the urban observatory and rural automatic weather station in Taiyuan

类型	站名	经纬度	海拔/m	基本情况
城市站	新建路	112.53°E, 37.87°N	804	区域加密自动气象站,位于太原市市政府内,周围完全城市化
乡村站	观象台	112.58°E, 37.62°N	776	国家基本气象站,位于太原市小店区张华村东北,距离最近城镇区边缘10 km,测点附近地势平坦,周围以农田为主

图6是不同试验模拟的太原市UHI强度与观测的日变化对比。可以看出,3组试验模拟的UHI日变化特征与观测的大致相同,日变化均表现出明显的“单峰型”特征,但USGS1992试验模拟的UHI值明显偏低。其中夜间19时至次日06时,DMSP试验和观测的UHI强度基本稳定在5℃左右,而USGS1992试验模拟值基本稳定在2℃;白天10~17时,前者的UHI强度基本稳定在2℃左右,而后者基本稳定在0℃;06~10时是UHI快速减弱期,17~19时是UHI快速加强期。另外,2组DMSP试验模拟的UHI强度除17~21时时段略高于观测外,其它时段均小于观测。

城市热岛强度的加强,主要是由于城市下垫面较乡村热容量大、蒸发和蒸腾小,能够更有效地将太阳辐射转为热量储存至夜间。图7为8月16日04时DMSP试验与USGS试验模拟的2m气温预报差值图。可以看出在晴天条件下,DMSP2006与USGS1992的试验相比,太原城区夜间最低气温升高3℃;DMSP2012与USGS1992的试验相比,太原城区夜间最

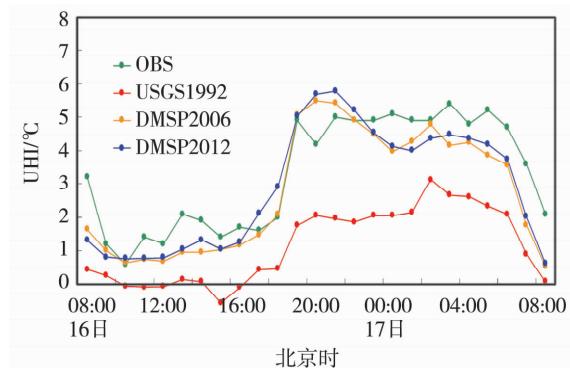


图6 2013年8月16日08时至17日08时

不同试验及观测的UHI强度日变化

Fig. 6 Diurnal variations of UHI intensity simulated by different experiments and observation from 08:00 16 to 08:00 17 August 2013

低气温升高5℃,UHI强度升高2~3℃,UHI增强区集中在太原新建城区及大运高速公路一带的新建城镇群。可见,DMSP2012试验能够更准确地反映太原地区UHI强度的日变化特征,以及下垫面扩张造成的城市夜间升温明显,热岛强度增强。

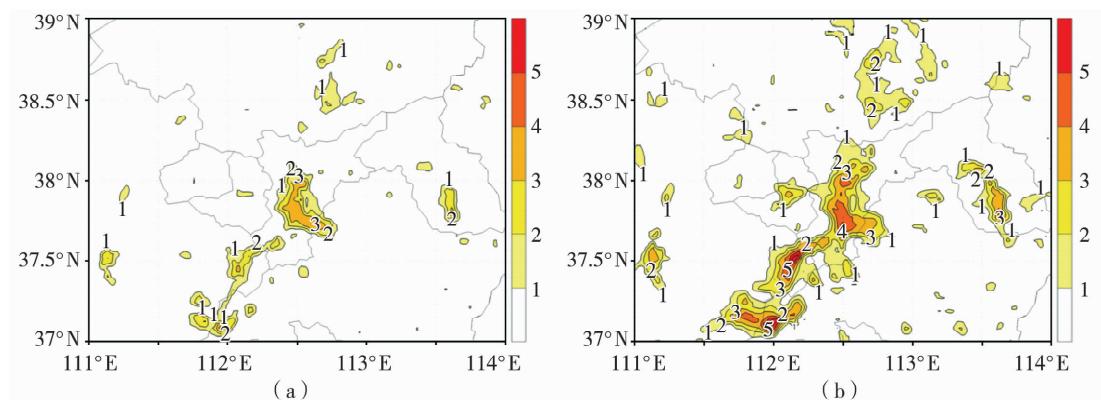


图7 2013年8月16日04时不同试验方案2m气温的差值(单位:℃)

(a) DMSP2006与USGS1992的差值,(b) DMSP2012与USGS1992的差值

Fig. 7 Difference of 2 m temperature simulated by different experiments at 04:00 on 16 August 2013 (Unit: °C)

(a) difference between DMSP2006 and USGS1992, (b) difference between DMSP2012 and USGS1992

3.2 城市扩张对边界层特征影响的数值模拟

3.2.1 城市扩张对地表能量平衡的影响

城市发展对城市地表的能量和水汽传输过程有显著的影响。城市下垫面的地表能量平衡可表示为:

$$R_n = H + LE + G_0 \quad (2)$$

式(2)中, R_n 为净辐射通量, H 为感热通量, LE 为潜热通量, G_0 为储热量, 单位均为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

图 8 是太原城区地表热量通量的日变化。净辐射通量是地表辐射收支平衡中用来加热大气和地表的主要能量来源。图 8a 显示, 3 组试验模拟的净辐射通量日变化差异不明显, 夜间(19 时至次日 06 时)净辐射通量为负值且变化平缓, 日出后转为正值, 13 时达到最大值, 约为 $650 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。白天下垫面接受的净辐射能量通过感热、潜热通量来加热大气, 同时通过储热将一部分能量存储起来, 并在夜间释放。

通常情况下, 白天的地表温度高于近地面气温, 从而热量、水汽等由地表向大气传输, 地表热量、水汽通量为正值; 夜间则相反。城市扩张, 易造成地表植被减少、地表反照率变小, 使得白天地表更容易升温, 提供给大气的热量更多。图 8b 为模式模拟的感热通

量的日变化。可见, USGS 试验, 12:00 地表向大气的感热传输最强, 18:00 后出现大气向地表的感热传输, 但强度小于白天; DMSP2006 与 DMSP2012 试验, 12:00 地表向大气的感热传输更为强烈, 夜间地表向大气的感热传输减弱, 接近 $0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 且 2012 年下垫面试验模拟的感热略高于 2006 年的, 尤其白天差异更明显。随着城市化扩张, 白天城市地表向大气的感热传输加强, 2012 年下垫面试验较 1992 年下垫面增强约 $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

由于植被蒸腾作用所需时间较长, 潜热通量峰值出现时间滞后于感热通量约 1 h(图 8c)。城市化使得植被覆盖减少、地表湿度减小, 土壤蒸发和植被蒸腾明显减弱, 潜热通量日变化幅度减小。2012 年较 1992 年潜热通量削弱约 $250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 8c)。由于城市的热力特性(如热容和热传导较大)以及复杂的结构特征, 使得大量多余的能量存储于建筑物中。与 1992 年下垫面试验相比, 2012 年下垫面试验白天储热能力增强约 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 8d)。

综上可见, 城市下垫面扩张改变了地表能量分配关系, 地表感热传输明显加强, 潜热通量明显减弱, 在城市冠层作用下, 储热能力增强。

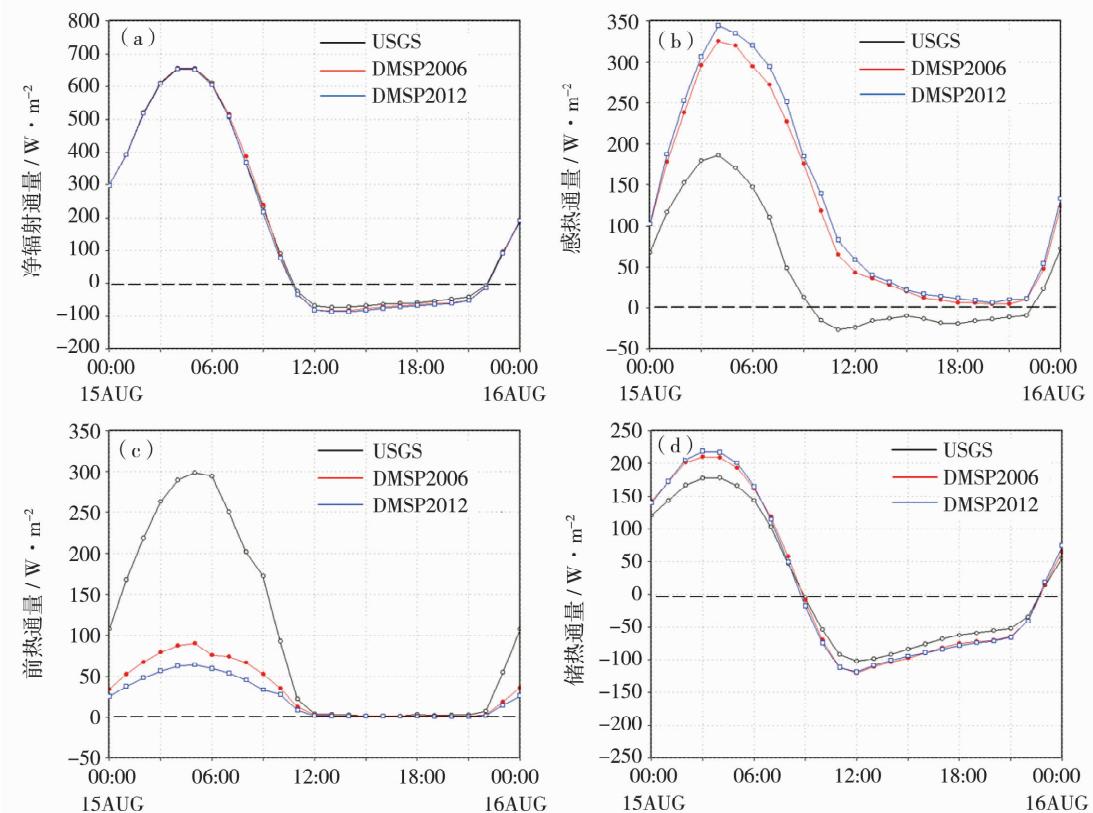


图 8 不同试验模拟的城区站地表能量通量的日变化

(a) 净辐射通量, (b) 感热通量, (c) 潜热通量, (d) 储热项

Fig. 8 Diurnal variations of surface energy flux simulated by the three experiments

(a) net radiation flux, (b) sensible heat flux, (c) latent heat flux, (d) stored heat term

3.2.2 城市扩张对水汽传输的影响

图9为城市上空水汽混合比的时空分布。相比USGS1992试验,由于地表水汽传输减少,DMSP2006试验中1 km以下大气中水汽含量减少,最大减少幅度为 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而2~4 km高度水汽含量增多,最大增加幅度为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;DMSP2012试验中,1 km以下水汽含量减少幅度达 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,2~4 km高

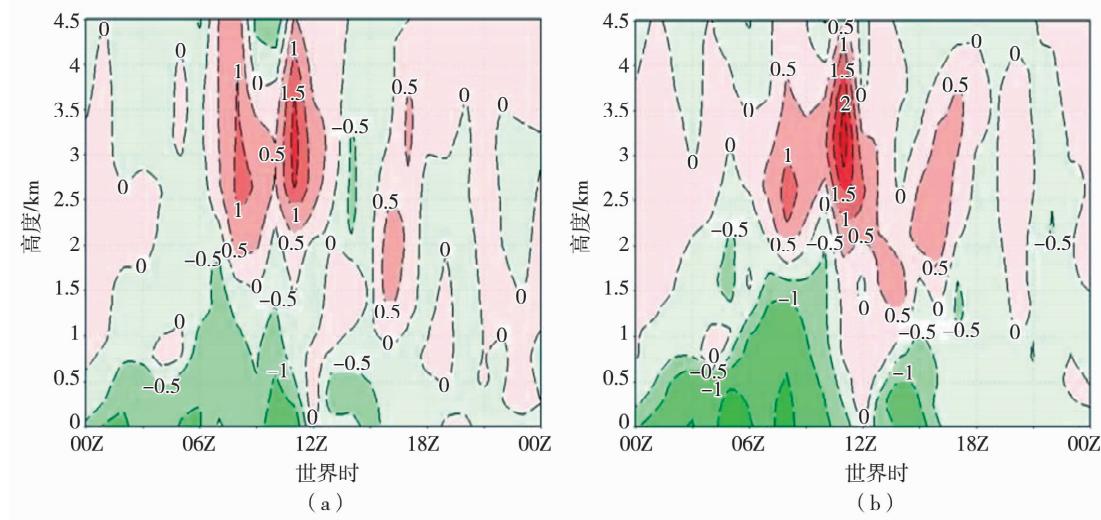


图9 城区站上空水汽混合比的时空变化(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

(a) DMSP2006与USGS1992的差值,(b) DMSP2012与USGS1992的差值

Fig. 9 The variations of water vapor mixing ratio over urban station (Unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

(a) the difference between DMSP2006 and USGS1992,

(b) the difference between DMSP2012 and USGS1992

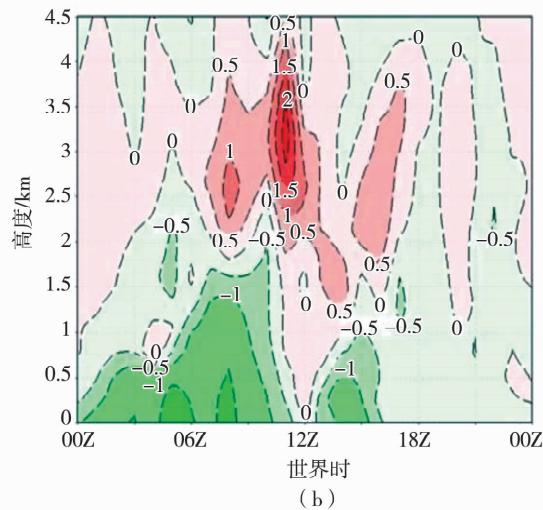
3.2.3 城市扩张对湍流动能的影响

城市发展对湍流动能的影响可通过湍流动能来表述。比较城市站点上空15日08:00至16日08:00的湍流时空分布(图10),发现USGS1992、DMSP2006、DMSP2012试验的湍流动能的垂直分布结构相似,白天较强,夜间明显减弱,最大值均出现在14:00左右,湍流动能最大值依次为 $1.4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $1.8 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,影响高度分别达到1.6 km、1.8 km、2.0 km。可见,随着城市下垫面扩张,湍流动能的影响高度增加,湍流混合加剧。

3.2.4 城市扩张对温度层结的影响

城市发展对温度层结产生显著的影响。传统探空资料每天仅有08时、20时的探空,且对边界层内气象要素的探测能力有限,而山西省气象局的“RPG-HATPRO-G3”微波辐射计,能够实时获取边界层内位温廓线,垂直分辨率约为100 m,可用于对模式结果的验证。图11给出实况观测与模式模拟的太原城区混合层的发展变化。对比可见,忽略由于观

度水汽含量增幅为 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,水汽含量变化幅度高于DMSP2006试验。可见,随着城市下垫面扩张,地表水汽传输减少,引起边界层内的水汽含量减少,然而由于湍流混合加剧,2~4 km高度内水汽含量明显增加。近地面水汽含量的减少,使得更多的热量用于加热地表和大气,致使城市地表温度、近地面气温的日变化幅度增加。



测位置不同造成的低层差异,DMSP2012试验的边界层位温垂直廓线与实况观测基本吻合。日出后,地表受热,不断有热气泡从地面向高空传输,湍流混合开始发展,城市混合层顶抬升;08:00,USGS1992试验位温梯度为正,为稳定层结,DMSP试验200 m以下出现弱混合层;12:00,USGS1992、DMSP2006、DMSP2012试验均出现混合层,混合层顶高度分别在400 m、500 m、700 m;14:00,USGS1992试验的混合层发展至700 m,DMSP2006发展到800 m,而DMSP2012试验发展到1 500 m,且DMSP2012出现充分混合层(400~1 500 m);下午,随着太阳辐射减弱,湍流混合减弱,混合层高度降低,至20:00,USGS混合层消失,DMSP混合层高度降低至200 m以内。以上表明城市扩张导致城市上空混合发展更为强烈,持续时间更长,混合层高度抬升。随着城市下垫面的扩张,14:00城区上空边界层的高度抬高了800 m(DMSP2012下垫面试验与USGS1992下垫面试验相比)。

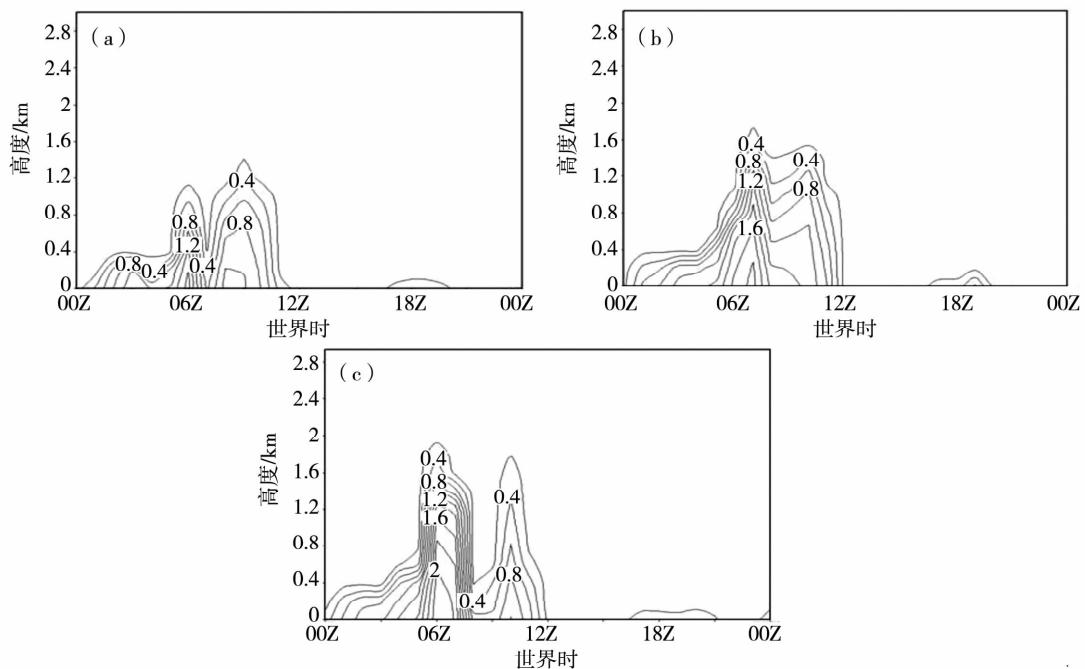


图 10 2013 年 8 月 15 日不同试验城区站上空湍流动能分布

(a) USGS1992, (b) DMSP2006, (c) DMSP2012

Fig. 10 Distribution of turbulence energy simulated by different experiments over urban station

(a) USGS1992, (b) DMSP2006, (c) DMSP2012

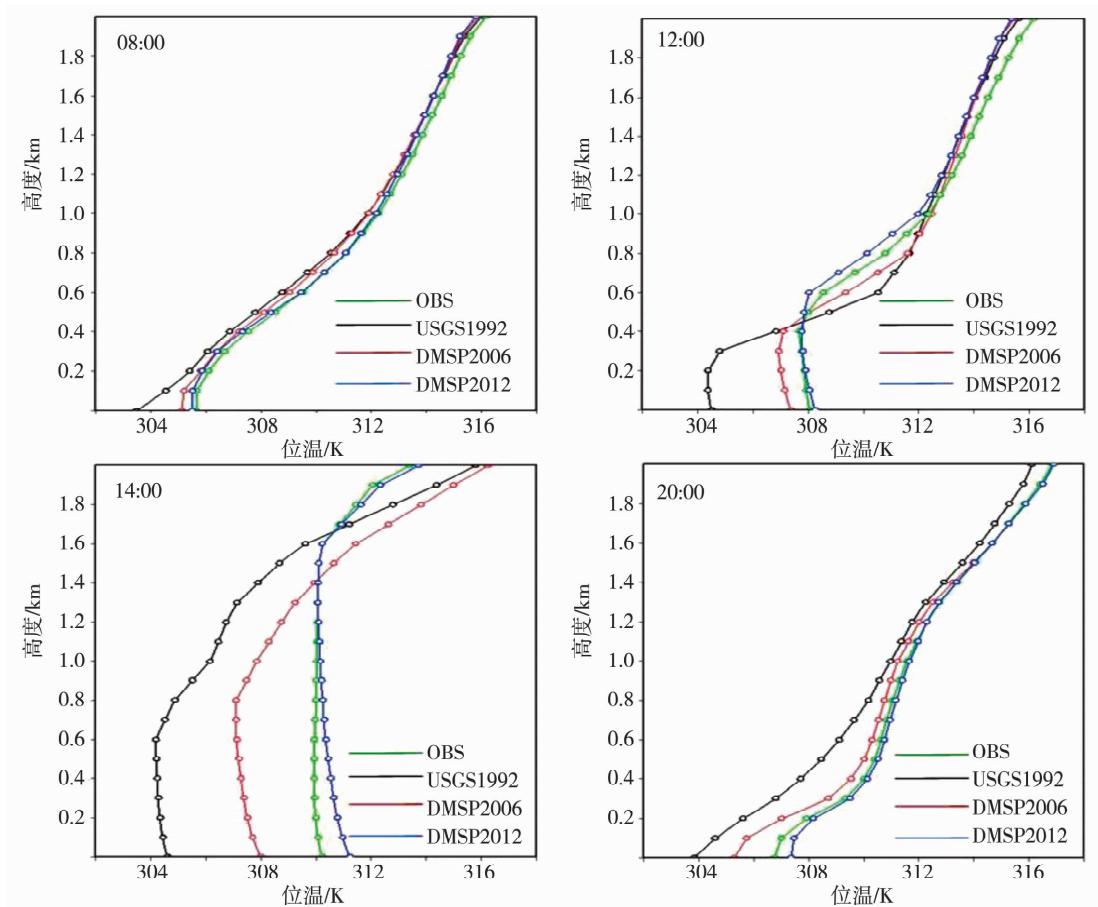


图 11 城区站上空混合层发展变化

Fig. 11 The changes of mixing layer over urban station

4 结论和讨论

利用高分辨率卫星夜间灯光数据获取的最新地表参数,能够显著提高模式的模拟性能,明显改善了对地表能量平衡、湍流发展、水汽传输等的模拟,有助于更深入地了解城市边界层真实的发展变化。主要结论如下:

(1) 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据对 WRF 模式中 USGS 地表修正后,模式能够更准确地反映太原主城区和高速公路沿线小规模建筑群的扩张。

(2) 基于 DMSP 资料的地表参数的数值模拟能够显著改善对地表温度、 2 m 气温的预报能力,模拟的 UHI 强度和范围更接近于 MODIS 卫星反演值,夜间气温有 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的改善。

(3) 城市下垫面扩张,使城区夜间升温明显,热岛强度增强。在 8 月晴天条件下,与 1992 年城市化状况相比,2012 年太原城区夜间 2 m 气温升高 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,UHI 强度升高 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 城市下垫面扩张,显著改变了地表能量分配关系,使得城市地表向大气的感热传输加强,2012 年下垫面较 1992 年下垫面试验的感热通量增强约 $150\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,潜热通量减弱约 $250\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;在城市冠层作用下,储热能力增强,2012 年较 1992 年试验增强约 $50\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

(5) 由于城市下垫面扩张,城区地表水汽输送明显减弱,近地面水汽含量减少, $2\sim 4\text{ km}$ 高度水汽含量增加,同时湍流动能的影响高度增加,湍流混合加剧,城区边界层的高度抬高了 800 m (2012 年与 1992 年相比),城市上空混合层加深,持续时间更长。

本文仅研究分析了一个个例,而且下垫面类型变化只是城市化进程中的一个方面,城市气象学已发展到考虑城市人为热和人为水汽等影响因子。城市化进程对边界层内气象要素更加全面的影响,还有待于今后进一步的研究。

参考文献:

- [1] 张建忠,孙瑾,王冠岚,等.北京地区空气质量指数时空分布特征及其与气象条件的关系[J].气象与环境科学,2014,37(1):33-39.
- [2] 郭丽香,章新平,吴华武,等.城市化对湖南长沙气温的影响[J].干旱气象,2012,30(3):380-388.
- [3] 郭凌曜.城市化对局地气候的影响分析[J].气象与环境科学,2009,32(3):37-42.
- [4] 王晓默,董宁.济宁市城市化对气温的影响[J].干旱气象,2013,31(4):732-737.
- [5] 宋轩,段金龙,杜丽平.城市热岛效应研究概况[J].气象与环境科学,2009,32(3):68-72.
- [6] 寿亦萱,张大林.城市热岛效应的研究进展与展望[J].气象学报,2012,70(3):338-353.
- [7] Zhang D L, Shou Y X, Dickerson R R. Upstream urbanization exacerbates urban heat island effects[J]. Geophysical Research Letters,2009,36,L24401, doi:10.1029/2009GL041082.
- [8] Miao S, Chen F, Margaret A L M, et al. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2009,48(3):484-501.
- [9] 刘和平,朱玉周,代佩玲,等.郑州市城市气候特征分析[J].气象与环境科学,2009,32(1):72-74.
- [10] 江晓燕,张朝林,高华,等.城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响-个例分析[J].气象学报,2007,65(2):301-307.
- [11] 陈燕,蒋维楣.南京城市化进程对大气边界层的影响研究[J].地球物理学报,2007,50(1):66-73.
- [12] 王腾蛟,张镭,张博凯,等.城市下垫面对河谷城市兰州冬季热岛效应及边界层结构的影响[J].气象学报,2013,71(6):1115-1129.
- [13] Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model[J]. J Geophys Res, 2003,108(D22):8851, doi:10.1029/2002JD003296.
- [14] 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. Fifth Conf. on Urban Environment, Vancouver, BC, Canada, Amer. Meteor. Soc.
- [15] 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[J]. Boundary - Layer Meteorology, 2001, 101(3):329-358.
- [16] Kusaka H, and Kimura F. Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004,43(12):1899-1910.
- [17] Kusaka H, Kimura F, Hirakuchi H, et al. The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2000,78(4):405-420.
- [18] Yang X, Hou Y, Chen B. Observed surface warming induced by urbanization in east China[J]. Journal of Geophysical research, 2011,116, D14113, doi:10.1029/2010JD015452.
- [19] 蒋维楣,陈燕.人为热对城市边界层结构影响研究[J].大气科学,2007,31(1):37-47.
- [20] 卓莉,陈晋,史培军,等.基于夜间灯光数据的中国人口密度模拟[J].地理学报,2005,60(2):266-276.
- [21] 卓莉,李强,史培军,等.基于夜间灯光数据的中国城市用地扩展类型[J].地理学报,2006,61(2):169-178.

(下转第 933 页)

Statistical Characteristics of Turbulence and Comparison of Turbulence Fluxes in Urban and Suburb of Nanjing in Summer

WANG Ying, JIANG Haimei, JIN Wenjie, HAN Yongxiang

(Nanjing University of Information Science and Technology, Key Laboratory for Aerosol - Cloud - Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the observational turbulence data from the three-dimensional experiments at urban and suburban sites of Nanjing in summer of 2010, the statistical characteristics of turbulence and fluxes were comparatively analyzed. The results showed that the average wind speed over urban surface was larger than that over suburb surface. The turbulence intensity I_x and I_y in the horizontal directions of urban and suburb was greater than I_z in the vertical direction, and the I_x was greater than I_y . The difference of I_x and I_y between suburb and urban was small, but the I_z of suburb was significantly less than that of urban. The wind speed normalized standard deviations σ_u/u_* , σ_v/u_* , σ_w/u_* in urban and suburb could be fitted according to the ‘law of 1/3 fractional power’, and the σ_u/u_* and σ_v/u_* in urban were obviously less than those in other areas, while the σ_w/u_* was greater than that in suburb. And then the fitting curves of wind speed normalized standard deviations in suburb were similar with farmland. In summer, the latent heat flux was leading in suburb, while the sensible heat flux was leading in urban, and the influence of solar radiation on the turbulence heat flux in urban was larger than that in suburb.

Key words: urban and suburb comparison; turbulence intensity; turbulence statistics; turbulence heat fluxes

(上接第 925 页)

A Case Study on the Effect of Urban Underlying Expansion on Atmosphere Boundary Layer Characteristics in Taiyuan

DONG Chunqing, GUO Yuanyuan, ZHAO Guixiang, QIU Guiqiang

(Shanxi Meteorological Observatory, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In order to understand the effect of urbanization on the local urban boundary layer, based on the light intensity at night from high resolution satellite, the latest spatial distribution of land use types in urban was obtained, firstly. And on this basis the impact of urbanization development on characteristics of atmosphere boundary layer (ABL) over Taiyuan during a high temperature event which occurred on 14 to 16 August 2013 was conducted by introducing the high resolution land use of urban to numerical model. The results showed that the amended surface parameter in model with the nighttime light images from DMSP/OLS could not only accurately show the urban expansion in Taiyuan’s main city zones and small scale buildings along highways, but also effectively improved the forecasting capability of model, especially on skin and surface temperature. The expansion of urban underlying has a significant influence on the increase of the urban heat island (UHI) intensity and night temperature of urban areas. Compared with urban underlying in 1992, the temperature at night of urban areas in Taiyuan increased by 5 °C under sunny weather condition, and the intensity of UHI increased by 2 ~ 3 °C. The expansion of urban changed the distribution of earth surface energy, with a significant increase of sensible heat flux and decrease of latent flux, and then the heat storage capability under the effect of the urban canopy was enhanced. Further study on the turbulent exchange and the water vapor transfer in the boundary layer found that the water vapor transfer from the urban surface and the water vapor content in the boundary layer decreased, while the content over the height of 2 ~ 4 km increased. The height influenced by turbulent kinetic energy increased, and the turbulence strengthened. The boundary layer over urban at 14:00 BT was even lifted by 800 m, and the mixing layer deepened and lasted longer.

Key words: urbanization; UHI; nighttime light intensity; urban boundary layer