

肖丹,陈静,陈章,等. 成都精细下垫面信息对城市气象影响的模拟试验[J]. 气象,2011,37(3):298-308.

成都精细下垫面信息对城市气象影响的模拟试验^{*}

肖 丹¹ 陈 静² 陈 章³ 张 波³

1 成都信息工程学院, 成都 610225

2 国家气象中心, 北京 100081

3 成都市气象局, 成都 610072

提 要: 为了提高成都市精细化天气预报水平,使用成都地区精细下垫面土地利用资料,在 WRF 中耦合了单层城市冠层模式,对 2008 年 7 月 6 日晴空背景下的成都城市气象特征进行了模拟,并和使用旧土地利用资料、slab 模式的模拟结果进行了对比分析。模拟结果表明城区因为不透水下垫面的增加,使得地表蒸发和地表水汽通量显著减小,潜热通量减小,感热通量增大;城市建筑物对长波辐射有截获作用,使城市湍流作用增强,边界层高度增高;使用精细下垫面资料和单层城市冠层模式,模拟的 2 m 温度负偏差和均方根误差减小;城市面积扩大和建筑物增多,使城市热岛效应增强,城区 10 m 风速减小,城市下风方垂直环流增强。

关键词: 精细下垫面, 城市冠层, 城市气象, 模拟

Effect Simulation of Chengdu Fine Underlying Surface Information on Urban Meteorology

XIAO Dan¹ CHEN Jing² CHEN Zhang³ ZHANG Bo³

1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 National Meteorological Center, Beijing 100081

3 Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu 610072

Abstract: In order to improve the level of Chengdu fine weather forecast, using Chengdu fine underlying surface data, the urban meteorological characteristics of Chengdu are simulated by the WRF coupled with single-layer urban canopy model for a clear day, on July 6, 2008, and those are compared to simulations with old land-use data and slab model. The result shows that because of urban impervious underlying surface area increasing, the surface evaporation and upward moisture flux are significantly reduced, latent heat flux decreases and sensible heat flux increases. Urban buildings can intercept long-wave radiation energy, so urban turbulence enhances and boundary layer height becomes higher; With the fine land-use data and single-layer urban canopy model, both negative bias and root-mean-square error of 2-m temperature decrease; Urban area expansion and more buildings have led to the result that the urban heat island effect strengthens, urban 10-m wind speed decreases, heat circulation between urban and suburban areas enhances, and local vertical circulation boosts.

Key words: fine underlying surface, urban canopy, urban meteorology, simulation

引 言

随着 20 世纪 70 年代末中国改革开放政策的实

施,中国的经济和工业化实现了持续快速的增长,从而推动了中国城市化进程的发展。我国城市化率已从 1978 年的 20%左右提高到 2008 年的 44.9%,城镇人口达到 5.9 亿^[1],并且现阶段城市化进入了更

^{*} 国家自然科学基金(40675041)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706001,GYHY200906007)共同资助
2010 年 2 月 26 日收稿; 2010 年 5 月 14 日收修定稿
第一作者:肖丹,主要从事数值预报研究. Email: xiaodan0532@163. com

加快速的发展时期。如珠江三角洲地区和经济特区一带的城市化水平到“十五”规划结束时将达到60%左右^[2]。城市化建设推动了经济繁荣和社会进步,同时也带来了一系列严重的生态环境问题,例如耕地减少、环境污染、城市交通拥挤等。已有的研究^[3-4]表明,城市化的发展对城市气温、湿度、能见度、风和降水等都产生了影响。城市气候与郊区相比有“热岛”、“干岛”、“湿岛”、“混浊岛”和“雨岛”等“五岛”效应,其中以“热岛”效应最为显著^[5-7]。城市对天气、气候的影响主要表现为热力和动力作用两个方面。城市中工业生产、交通、居民生活等排放出大量废热,另外以钢筋水泥、砖石、沥青等不透水的建筑材料为主的都市地表与以疏松、植被覆盖的土壤为主的郊区地表的热力性质的差异,使得城市的温度明显高于郊区的温度。另一方面,由于城市中建筑物鳞次栉比,其三维的建筑群结构改变了太阳短波辐射、大气和地面长波辐射的传输过程。高低错落分布不均的建筑物,使得城市下垫面的粗糙度增大,对低层大气的摩擦拖曳作用增强,边界层的湍流作用增强,从而对局地大气环流和天气产生影响。Hjelmfelt^[8]指出 St. Louis 地表粗糙度的增大增强了边界层的对流活动。蒙伟光等^[9]模拟的与城市影响有关的低层辐合主要位于 500 m 以下的近地面层,开始时形成于城市的上风方向,并在下风方向增强,由此引起的强烈上升运动有利于新的对流的启动和发展,促使雷暴强度增强。Huff 等^[10]发现由于城市化的作用 1955—1970 年美国 6 大城市暖季降水增加了 9%~17%。

数值模式已经成为研究天气、气候的重要手段之一。数值模式中对下垫面描述的精细程度直接影响到模式对局地天气的预报效果。如何在下垫面中加入考虑城市效应的地表信息,是随着人们对城市

天气、气候的认识以及数值模式的发展而发展的,并受到计算机资源的限制。中尺度模式常常被修改用以更好地分析城市的热岛效应,Taha^[11]将修改模式的方法分为两种:一种是修改地表热力平衡方程中土壤的热力学常数(热容、热导率)和参数(地表反射率、粗糙度、土壤有效湿度);另一种方法是在大气模式中耦合一个城市冠层模式。Oke^[12]将城市冠层定义为从地面到建筑物屋顶的这一层,它与建筑物高度、密度、几何形状、建筑材料、街道宽度和走向、绿化面积等关系密切。城市冠层模式的发展也经历了简单到复杂、粗糙到较为细致的过程。最简单的 slab 模式^[13](图 1a),城市下垫面在模式中为裸土或平面,只区分不同下垫面类型的热容量、热传导、反射率、粗糙度等,没有考虑建筑物的几何形状、高度、墙面和屋顶等的不同影响。Kondo 等^[14-15]和 Vu 等^[16]发展了多层城市冠层模式(图 1c)。多层模式不仅区分了建筑墙面、屋顶、路面的不同影响,而且将城市冠层划分了多层,考虑各层间的相互作用,建筑的集合形状为三维。由于多层城市冠层模式对水平分辨率要求很高,目前的中尺度数值模式难以达到,限制了它在中尺度模式中的应用。Masson^[17], Kusaka 等^[13]提出了单层城市冠层模式(图 1b),它也区分了墙面、屋顶、地面的不同影响,同时将街区简化为二维,但辐射过程处理为三维。Kusaka 等^[13]的研究指出,使用单层城市冠层模式计算的地表温度、净辐射和观测接近,对地表能量的模拟效果和使用多层城市冠层模式的效果相当。现在,中尺度模式 MM5 和 WRF 中已提供了单层城市冠层模式。本文利用成都精细土地利用类型信息,在 WRF 模式中耦合了单层城市冠层模式,通过与使用原始土地利用信息以及 slab 模式的 WRF 模式模拟结果进行比较,从而对成都城市气象特征进行了细致的分析。

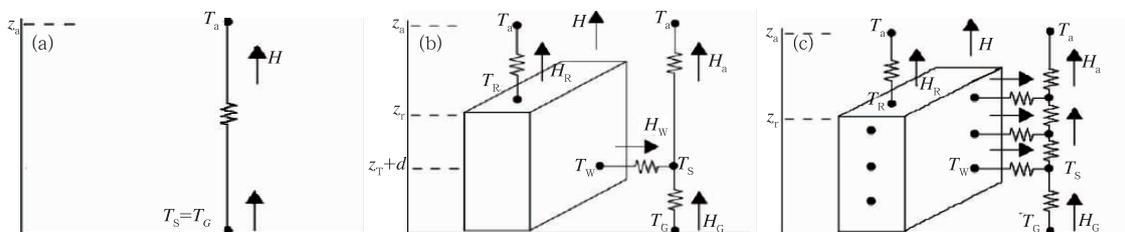


图 1 3 种城市冠层模式的温度和能量通量(引自文献[18])

(a) slab 模式; (b) 单层城市冠层; (c) 多层城市冠层

Fig. 1 Three urban canopy models:

(a) slab model, (b) single-layer urban canopy model, and (c) multi-layer urban canopy model

1 成都地区精细下垫面的引入

模式下垫面的土地利用类型可以影响到地面反射率、放射率、粗糙度长度、热惯性等,因此其是控制陆面过程和边界层结构的重要参数之一。WRF 模式静态资料中的土地利用类型资料是由美国地质勘测部发布的^[19],其最高分辨率为 30 分,共有 24 种土地利用类型。这个资料是从 1 km 甚高分辨率辐射计 1992 年 4 月到 1993 年 3 月 12 个月的数据中提取的^[20]。随着城市化进程的发展,成都城区面积不断扩大,1994 年底,成都城区建成面积为 84.6 km²^[21],到 2004 年成都的中心城(即外环路以内区域)面积已达 598 km²^[22]。因此,WRF 中旧的城市土地利用类型范围比实际范围偏小。另外,新的土地利用资料已从原来的 24 类扩展到 33 类,其中第一类城市土地利用类型又被细分为 3 类(在新的土地利用类型中被列为第 31~33 类):第 31 类,低密度住宅区,不透水地表占据总地表面积的 20%~49%;第 32 类,高密度住宅区,不透水地表占据总地表面积的 50%~79%;第 33 类,工商业区,不透水地表占据总地表面积的 80%~100%。

因此,利用成都市气象局提供的地理信息和 google earth 提供的卫星资料,本文对 WRF 自带的成都地区土地利用类型进行了订正,订正后成都城区面积扩大,并且将城市土地利用类型细分为低密度住宅区、高密度住宅区、工商业区 3 类,而城区以外的土地利用类型则没有做改变(见图 2)。在图 2a 中的黑色区域为 WRF 静态资料提供的旧的成都城市土地利用类型的范围,图 2b 中紫色、红色、粉红色区域则对应着新的城市土地利用类型,分别为:工商业区、高密度住宅区和低密度住宅区。工商业区大致和成都城区二环内区域对应,比二环范围略大;高密度住宅区则对应着二环外到三环的区域;低密度住宅区对应着成都三环到四环的区域。图 2b 中城区突出的西南部分为双流地区,其余零星分布的粉红色区域是成都下辖的 13 个区县的城区位置。比较图 2a 和 2b 可以看出,成都城区范围明显增大,新的城市土地利用资料比原来的资料更加细致地描绘出成都城区的分布特征,此精细下垫面信息将有益于提高成都地区的精细化数值预报水平。

2 数值模式和参数化方案

本文采用 Weather Forecast Model (WRF 3.0),

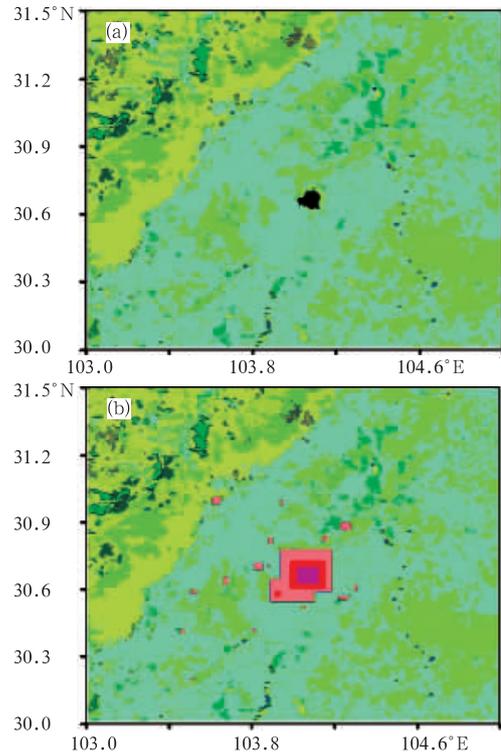


图 2 成都地区旧的(a)和新的(b)土地利用类型
Fig. 2 Old (a) and new (b) landuse types of Chengdu

它是一个非静力可压缩的中尺度天气预报模式,水平方向采用 Arakawa C 网格点,垂直方向则采用地形追随质量坐标。图 3 给出了模式的模拟区域,中心点为 31°N,104°E,3 层嵌套的格距分别是 27,9 和 3 km,相应的格点数分别为 194×209、180×180、156×162。模式水平坐标使用兰伯托投影坐标系,其标准纬度为 30°N 和 60°N。模式最外层的侧

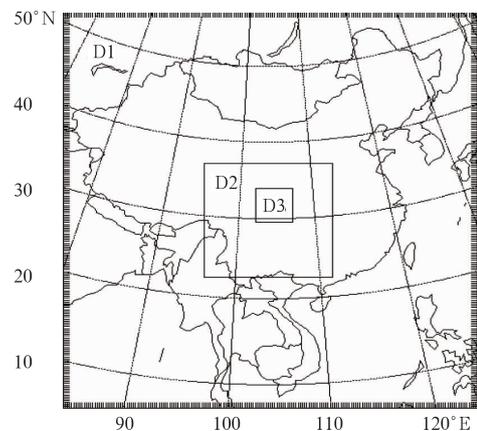


图 3 WRF 模式模拟的 3 层嵌套区域
D1, D2, D3 分别为第一、第二、第三层区域
Fig. 3 Configuration of the 3 two-way nested domains for WRF simulation
D1, D2 and D3 represent domain 1, domain 2 and domain 3 respectively

边界条件由国家气象中心的 T213 资料提供,内部使用双向嵌套,这样内层区域的信息可以反馈给外层区域。最外层区域覆盖了整个中国,用于捕获天气尺度的特征,最里层涵盖了成都地区,可以分辨局地的环流特征。垂直方向分辨率为 31 层,范围从地面到对流层顶 10 hPa 处^[23]。本文模式使用的物理方案与国家气象中心业务运行的 WRF 模式中的一致,长波辐射使用 rrtm 方案,短波辐射使用 Dudhia 方案,边界层使用 Mellor-Yamada-Janjic 方案,陆面过程采用 Noah 模式,积云对流参数化在 D1 和 D2 区域使用 Betts-Miller-Janjic 方案,在最里层 D3 区域则使用显式降水方案。

WRF 的 Noah 陆面模式中提供了单层城市冠层模式方案,它包括了以下特点^[24]:(a)参数化的街谷用于代表城市的几何特征,(b)考虑建筑物投影和辐射在建筑物间的反射(图 4),(c)考虑街谷的走向以及太阳高度角的日变化,(d)地表由不同走向的若干街谷组成,(e)冠层中风廓线呈指数形式分布,(f)屋顶、墙体、道路各区分为多层,用多层传输方程描述它们内部的温度,(g)考虑人为热的排放,(h)用一个甚薄的水桶模式处理水文过程。

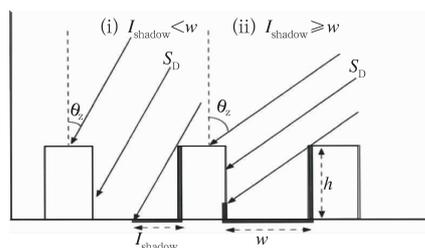


图 4 入射到水平面的太阳直接辐射(S_D)
 w 是街谷宽度, h 是建筑物高度, l_{shadow} 是
建筑物投影长度, θ_z 是太阳高度角

Fig. 4 The direct solar radiation (S_D)
incident on a horizontal surface
 w is the width, h is the building height,
 l_{shadow} is the length of the building projected
to the road, θ_z is the solar zenith angle

使用单层城市冠层模式时,针对成都的城市建筑特征,对部分城市特征参数进行了调整(见表 1)。由于成都二环以内的工商业区建筑物历史相对较长,建筑物以多层和小高层为主,街道相对较窄,故建筑物高度设置为 20 m,而街谷宽度(建筑物之间的平均宽度)设置为 15 m;21 世纪初,成都高层建筑逐步增多,出现了较多的二三十层的商业楼或住房,城市功能的完善使街道也逐步拓宽,成都二环路设计为 6 车道,三环路是 8 车道,因此将高、低密度住宅区的建筑物高度设置为 30 m,而街道宽度则分别设置为 20 和 25 m。天空可视度因子用于衡量城

市街道相对于天空的开阔度,工商业区、高密度住宅区和低密度住宅区的天空可视度因子分别设为 0.48,0.56,0.62。城市热岛效应形成的原因之一是城市中大量人为热的排放,城市冠层模式中将人为热的排放视为城市热源之一,这里将工商业区、高密度住宅区和低密度住宅区的人为热极大值分别设置为 90,70,50 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。单层城市冠层模式中一些参数的设置参考了文献[13]、[25]和[26],部分动力和热力学参数的设置见表 1。由于成都 13 个区县分布零散、面积小,这里低密度住宅区的参数主要是考虑成都主城区三环到四环间的建筑特征而设置。

表 1 单层城市冠层模式参数的设置

Table 1 Parameters of single-layer urban canopy

参数	工商业区	高密度住宅区	低密度住宅区
建筑物高度/m	20	30	30
街谷宽度/m	15	20	25
街谷动量粗糙度/m	1	1.5	1.5
街谷热量粗糙度/m	1	1.5	1.5
天空可视度因子	0.48	0.56	0.62
建筑物拖曳系数	0.1	0.1	0.1
人为热/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	80	60	40
屋顶、墙面、路面热容量/ $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	2.09×10^6	2.09×10^6	2.09×10^6
屋顶、墙面、路面热导率/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	1.67	1.67	1.67
屋顶、墙面、路面反射率	0.1	0.1	0.1
屋顶、墙面、路面放射率	0.97	0.97	0.97
屋顶、墙面、路面动量粗糙度/m	0.1	0.1	0.1
屋顶、墙面、路面热量粗糙度/m	0.1	0.1	0.1

3 成都城市热岛效应的模拟

3.1 成都地面站点

本文的降水、海平面气压和 2 m 温度实况使用成都人工和自动观测站的观测资料。由于有的自动站资料不全,所以本文选取的站点资料要求在试验期间降水、海平面气压和 2 m 温度有连续、稳定的观测,有 44 个站点(包括人工和自动观测站)满足此条件,而其余不满足这个条件的站点资料则没有使用。44 个站点的分布见图 5a,图 5a 方框中的站点位于成都市区,分布较为密集,图 5a 中分辨不清的站点,图 5b 将它们清晰地标出。

3.2 天气实况

Kusaka 等^[27]认为晴空和风场梯度小是出现显著热岛效应的极佳气象条件。2008 年 7 月 6 日由于受高压系统控制,成都地区天气晴朗,云量很少,

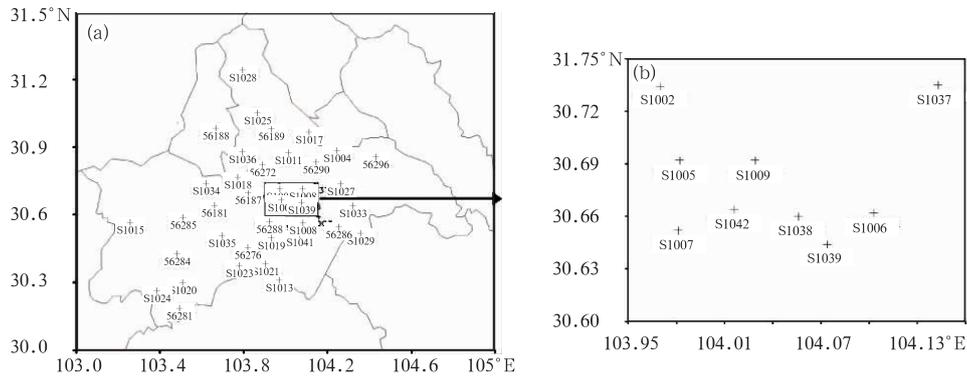


图 5 成都人工和自动观测站的分布
以 S 开头的站点为自动观测站

Fig. 5 Artificial and automatic meteorological observation stations in Chengdu
The numbered stations starting with latter S represent automatic meteorological observation stations

且地面风速和梯度都很小,观测站点的风速均在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,部分站点甚至风速为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。所以本文选取这次天气个例来模拟成都市的热岛效应及其城市气象特征。7月6日08时500 hPa高度场上我国西部地区处在高压系统下,盛行偏北风,四川地区受到下沉的干燥气流控制。从850 hPa的温度场上看,成都处在一个由 $24 \text{ }^\circ\text{C}$ 等温线围成的暖中心下(图略)。

图6为成都地区7月6日2 m最高气温分布图,可以看到6日气温很高,2 m最高气温达到 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 的站点有24个,其中有1个站点超过 $38 \text{ }^\circ\text{C}$,达到 $38.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图中的方框为成都城区新定义城市土地利用类型的区域,最里层的方框为第33类工商业区,最里层到中间层之间的方框区域为第32类高密度住宅区,中间层到最外层之间为第31类低密度住宅区。可以看到,在成都四环以内的区域(除最外层方框西南角突出位置为双流县外)2 m最高气温基本都在 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,比周边的站点高出 $2 \sim 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

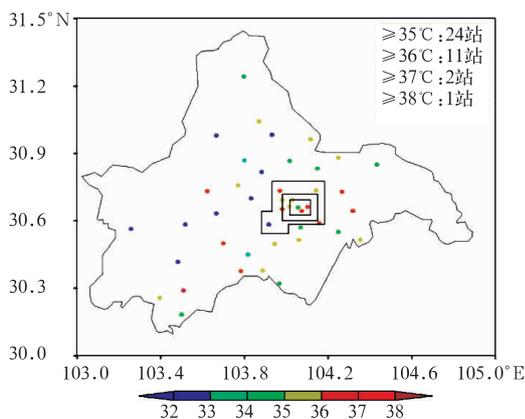


图 6 2008年7月6日成都44个
站点2 m最高气温分布

Fig. 6 Maximum 2 m temperature of Chengdu
at 44 stations on 6 July 2008

只有站点 S1038 为 $34.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 低于 $35 \text{ }^\circ\text{C}$, 这可能是它位于成都人民公园内, 公园的绿化和林荫效果导致了它的温度低于周围站点的温度。

3.3 WRF 模式数值试验结果分析

本文采用两种试验方案,第一种方案使用成都地区旧的土地利用类型资料,土地利用类型为24类(图2a所示),城市参数化方案使用 slab 模式,为了叙述方便,后面简称为 OldExp;第二种方案使用新的成都土地利用类型资料,土地利用类型为33类(图2b所示),耦合单层的城市冠层模式(参数设置见表1),为了叙述方便,后面简称为 NewExp。利用不同的土地利用类型资料分别积分 WRF 模式,积分开始时间为2008年7月5日20时,连续积分24小时到6日20时,然后对预报结果进行比较分析。

OldExp 和 NewExp 对环流形势的模拟很相近,差别很小,它们对6日的天气形势做了较好的模拟,四川地区处在500 hPa 高压系统和偏北气流的控制之下,850 hPa 温度场上成都地区处在高温区内,只是在高原上空温度和实况上有一定差异(图略)。

3.3.1 地表水汽和热量

本文选取成都城区点 $30.64^\circ\text{N}, 104.05^\circ\text{E}$ (在 NewExp 中该点位于土地利用类型为32的高密度住宅区范围内)来分析地表水汽和热量。从图7看,夜间 NewExp 和 OldExp 的地表蒸发和地表水汽通量都为0;白天 NewExp 的地表蒸发和地表水汽通量都明显小于 OldExp,甚至不到 OldExp 的一半,单位面积和单位时间内城区地表向大气输送的水分都显著减少。这是由于城区不透水地表的增加,阻碍了地表水分向大气的输送,使得地表蒸发和水汽通量锐减。郝丽萍^[28]研究发现,20世纪90年代以来成都市年平均相对湿度出现了持续明显的下降趋

势,成为全市最小值中心,城市干岛效应也相当突出。因此,成都城市化的发展使城区不透水地表增加,减少了地表水分向大气的输送,使成都市区出现明显的干岛效应。

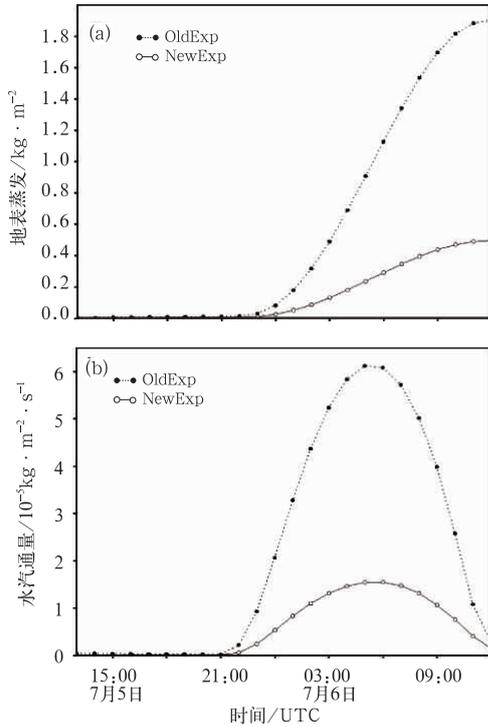


图 7 30.64°N,104.05°E 处地表蒸发 (a) 和地表水汽通量 (b) 的时间演变图

Fig. 7 The temporal variations of the surface evaporation (a, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) and the upward moisture flux at the surface (b, unit: $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) at the site of (30.64°N,104.05°E)

到达地表的向下长波辐射绝大部分时间都是 NewExp 大于 OldExp(图 8a),可见随着城市中建筑物面积的扩大,由于建筑物对长波辐射有吸收作用,使得到达地表的长波辐射增多,城市冠层对长波辐射有截获作用。OldExp 和 NewExp 到达地表的太阳短波辐射几乎一样(图 8b),城市冠层对太阳短波辐射的截获作用不明显。

图 9 地表感热通量和潜热通量都表现出明显的日变化特征,在夜间感热通量接近 $0 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,潜热通量为 $0 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,北京时间早上 6 时感热、潜热通量逐渐增大,至 14—15 时达到最大值。NewExp 模拟的地表感热通量大多数时间大于 OldExp 的模拟值,可见城市建筑物对感热也有截获作用。在 11—13 时,NewExp 模拟的感热通量小于 OldExp 的模拟值,这和该时段内 NewExp 模拟的向下长波辐射小于 OldExp 的模拟值是吻合的,这反映出地表对

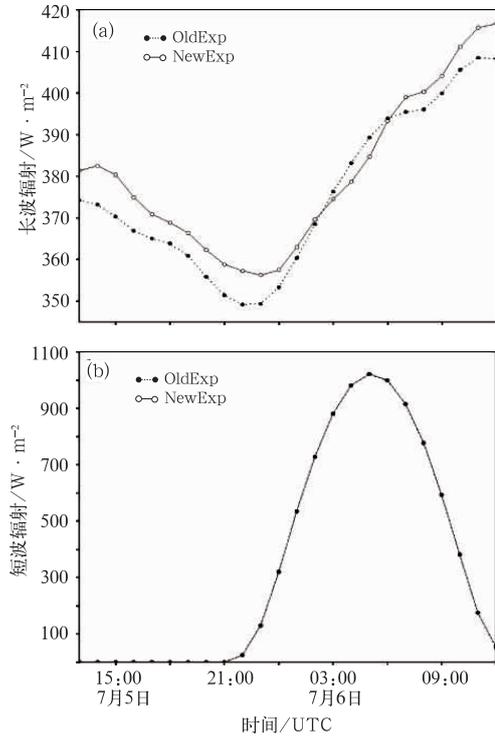


图 8 30.64°N,104.05°E 处到达地表的向下长波辐射 (a)和短波辐射(b)的时间演变图(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
Fig. 8 The temporal variations of the downward long wave flux (a) and the downward short wave flux (b) at ground surface at the site of (30.64°N,104.05°E,unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

大气的热量输送主要取决于地表热力辐射状况。北京时间 6 日 7—20 时,NewExp 模拟的地表潜热通量都小于 OldExp 的模拟值,可见由于城市中地表向大气的水分输送减小,城市中湿度减小,城市地表潜热通量显著减小。

北京时间 5 日 21 时—6 日下午 11 时,NewExp 地表湍流动能比 OldExp 的时大时小(图 10a),这是受到热力和动力作用的双重影响。NewExp 一方面由于城市建筑物高度增加,增大了地表动力粗糙度,使地表湍流动能减小,另一方面它吸收的长波辐射多数时候比 OldExp 多,热力作用使地表湍流动能增大。当动力对 NewExp 地表湍流动能的减小作用大于热力对它的增大作用时,NewExp 地表湍流动能比 OldExp 小;反之,NewExp 地表湍流动能比 OldExp 大。北京时间 6 日 14—20 时,由于 NewExp 热力作用大于动力作用,NewExp 地表湍流动能比 OldExp 大。从总体上看,NewExp 地表湍流动能多数时候比 OldExp 大。在模拟时段内,绝大多数时间 NewExp 模拟的边界层高度比 OldExp 的高(图 10b)。可见随着城市中高层建筑的增多,城市上空的湍流混合作用增强,同时由

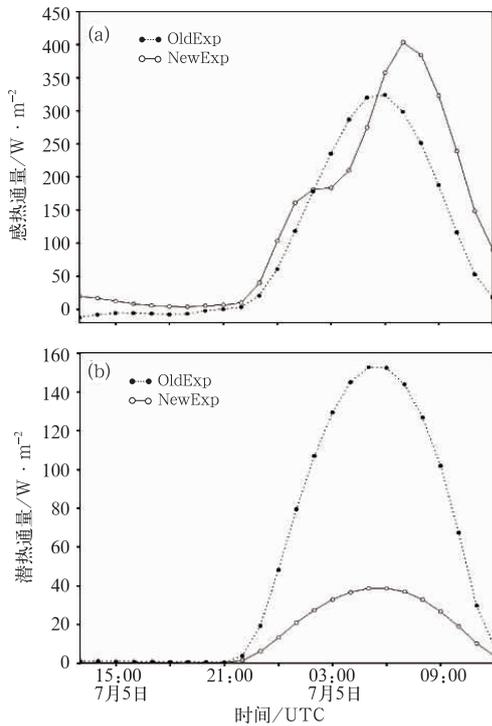


图 9 30.64°N,104.05°E 地表向上感热通量(a)和地表向上潜热通量(b)的时间演变图
 Fig.9 The temporal variations of the sensible heat flux at the surface (a) and the latent heat flux at the surface (b), at the site of (30.64°N,104.05°E,unit: $W \cdot m^{-2}$)

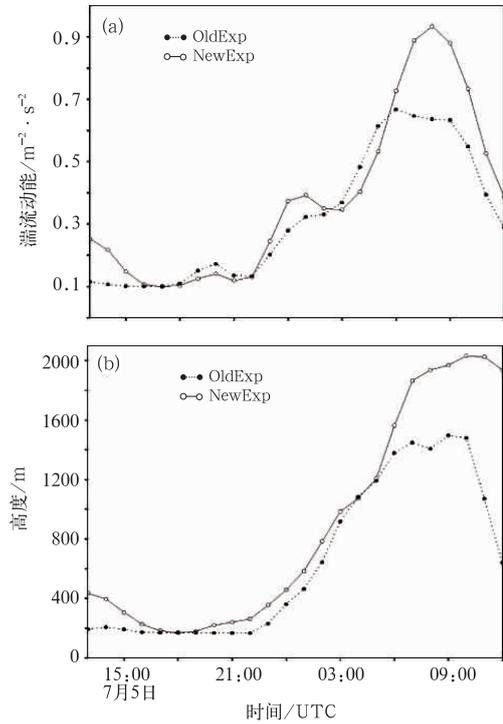


图 10 30.64°N,104.05°E 地表湍流动能和边界层高度的时间演变图,
 Fig.10 The temporal variations of the surface turbulence kinetic energy (a, unit: $m^{-2} \cdot s^{-2}$) and boundary layer height (b, unit:m) at 30.64°N,104.05°E

于城市地表向边界层大气输送的感热通量增多,边界层大气内部的对流活动增强,使得城市上空的边界层高度加深。

3.3.2 地面温度场模拟结果分析

城市冠层模式具有预报城市路面、墙面、屋顶、城市冠层温度的能力。城市路面、墙面、屋顶、城市冠层和地表温度都表现出日变化特征,它们都是在北京时 6 日 06 时降到最低,然后开始逐渐上升。建筑物屋顶在 13 时首先达到最高温度,这与屋顶辐射加热快有关。受到建筑物对光线的阻挡作用,路面、墙面和地表温度都在 15 时达到最高值,滞后于屋顶最高温度。路面的视角因子大于墙面,路面吸收的太阳直接辐射较多,而墙面的视角因子较小,白天吸收太阳直接辐射较少,其增温主要是依靠光线在路面、墙面之间的多次反射过程,所以白天墙面升温慢,路面温度高于墙面温度。白天城市冠层温度是所有温度中最低的,这是由于冠层温度是模式第一层大气温度、路面温度和墙面温度的权重函数,模式第一

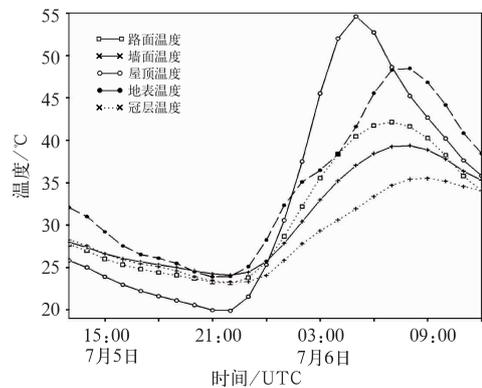


图 11 城市冠层模式模拟的路面温度(带方框的点线)、建筑物墙面温度(带加号的实线)、建筑物屋顶温度(带空心圆的实线)、城市地表温度(带实心圆的虚线)和城市冠层温度(带加号的点线)
 Fig.11 Urban road skin temperature (dotted line with open squares), wall skin temperature (solid line with plus), roof skin temperature (solid line with open circles), surface temperature (dashed line with filled circles) and urban canopy temperature (dotted line with plus) of urban canopy model simulation, unit: $^{\circ}C$, horizontal axis is universal time

层大气的温度低于路面温度和墙面温度,于是冠层温度也最低。屋顶温度表现出最大的日变化幅度,墙面温度日变化最小,这是由于屋顶视角因子大,白天辐射加热快,夜间辐射冷却快,所以温度变化最大;而墙面夜间可以吸收路面辐射,其降温速度慢,白天升温慢,所以日变化幅度最小。

从图 12 和图 13 看,OldExp 和 NewExp 模拟的地表温度总体分布很一致,温度等值线分布很相似,最低温度和温度距平最小值出现在西北角的山区,最高气温和温度距平最大值都出现在成都城区。沿城区分布的地表温度、距平的大值中心范围 NewExp 比 OldExp 大,且地表温度、距平的最大值 NewExp 比 OldExp 大 2~3 °C 左右。在 6 日 02 时,OldExp 中心城区的温度不到 24 °C,与周边地区的温差为 3 °C 左右。而 NewExp 城区最高温度超过了 24 °C,与周边地区的温差越往城中心越大,基本沿城市土地利用类型的分布而分布,温差从 3 °C 递增到 6 °C。在 6 日 14 时,OldExp 和 NewExp 模

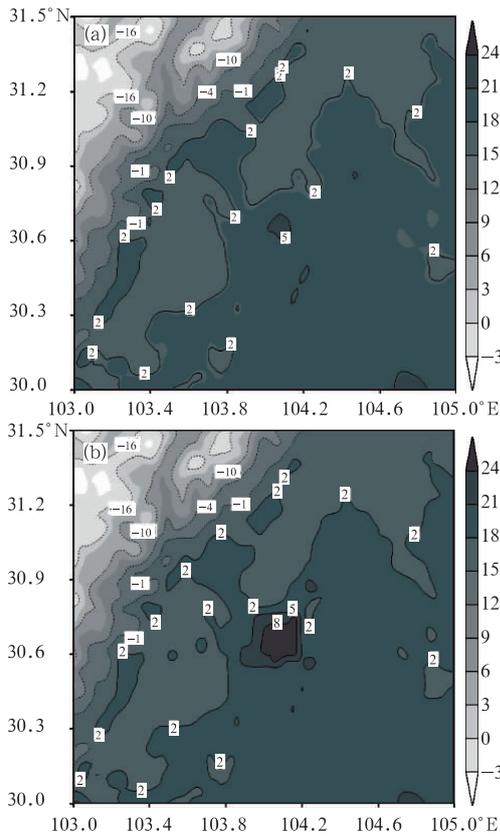


图 12 7 月 6 日 02 时地表温度(阴影区)和图示区域温度距平(等值线)
(a) OldExp; (b) NewExp (单位: °C)

Fig. 12 Surface temperature(shaded area) and temperature anomaly of the figure area (contour lines) at 02:00 BT 6 July 2008
(a) OldExp, (b) NewExp (unit: °C)

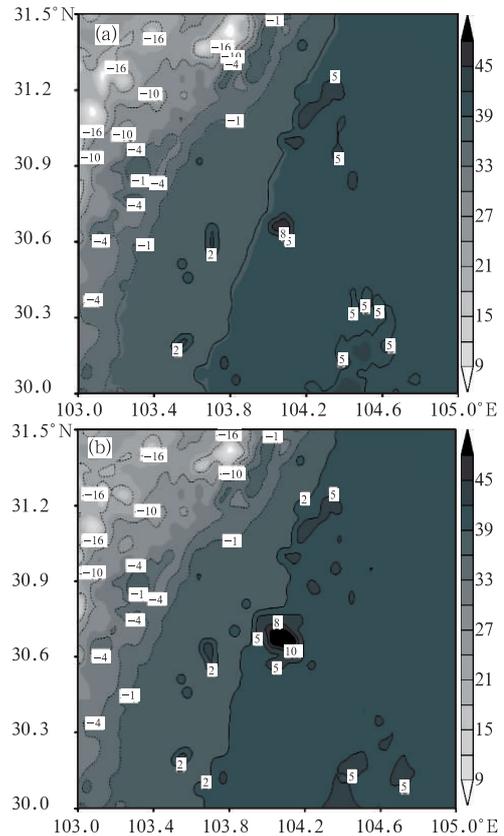


图 13 同图 12,但为 7 月 6 日 14 时
Fig. 13 As Fig. 12, but for 14:00 BT 6 July 2008

拟的中心城区的最高温度分别超过了 45 和 47 °C,中心城区与周边地区的温差比夜间更强。OldExp 模拟的中心城区与周边地区的温差达到 3~5 °C,NewExp 模拟的中心城区与周边地区的温差达到 3~8 °C。可见,城区面积的扩大和高层建筑的增多使城市热岛效应进一步加剧,NewExp 模拟的热岛效应比 OldExp 的强 2~3 °C 左右。

从表 2 看,OldExp 模拟的 2 m 温度 24 小时平均值,多数站点的平均误差表现出明显的负偏差,44 个站点的平均误差的平均值为 -1.13 °C,即模拟值低于观测值。NewExp 出现负偏差的站点比 OldExp 减少,且同一站点的负偏差绝对值大多比 OldExp 减小,44 个站点的平均误差的平均值为 -0.42 °C,即 NewExp 平均误差的绝对平均值比 OldExp 减小。所以 NewExp 模拟的 2 m 温度平均误差比 OldExp 减小。这是由于 NewExp 中城区面积扩大,城市地面白天吸收的热量增多,使 2 m 温度增高,负偏差减小。大多数站点 NewExp 的 2 m 温度均方根误差比 OldExp 减小,平均值 NewExp 也略低于 OldExp。因此,NewExp 模拟的 2 m 温度负偏差减小,预报准确度比 OldExp 提高。

表 2 44 个站点的 2 m 温度 5 日 21 时—6 日 20 时
24 小时观测平均值、标准差, OldExp、NewExp 的
平均误差和均方根误差(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Table 2 The 24 h observation mean values and
standard deviations, and OldExp and NewExp mean
errors and root mean square errors of 44 stations 2 m
temperatures from 21:00 BT 5 to 20:00 BT 6 July 2008

站点号	观测		OldExp		NewExp	
	平均值	标准差	平均 误差	均方根 误差	平均 误差	均方根 误差
S1002	28.6	4.92	-2.91	3.07	-1.52	2.32
S1003	26.8	6.42	-0.10	1.71	2.28	3.67
S1005	27.7	5.06	-1.89	2.23	0.02	2.26
S1006	29.4	4.75	-1.58	2.10	0.01	1.91
S1007	28.0	5.35	-2.00	2.39	0.10	2.33
S1009	30.1	3.85	-4.12	4.52	-1.69	2.49
S1037	25.6	5.54	0.49	1.25	2.49	3.33
S1038	28.0	4.01	-0.54	1.89	1.16	2.19
S1039	30.1	3.79	-2.47	2.98	-0.92	1.72
S1042	28.6	4.54	-2.32	2.74	-0.02	1.68
56288	26.0	4.17	-0.01	1.89	2.05	2.68
56189	26.1	4.18	-0.20	1.00	-0.17	0.94
56285	26.4	4.19	-0.65	1.39	-0.22	1.31
56181	25.9	3.89	-0.19	2.06	1.08	2.38
56187	25.8	3.92	-0.30	2.16	0.51	2.13
56272	26.2	4.31	-0.57	1.54	-0.28	1.51
56290	27.0	4.85	-1.22	2.20	-1.10	2.12
56286	27.0	4.66	0.40	2.08	1.49	2.67
56296	26.9	4.98	0.07	2.25	0.25	2.26
56188	25.7	4.17	0.55	1.22	0.61	1.14
56284	26.3	3.88	-0.95	2.03	-0.90	1.98
56281	26.4	4.92	-0.17	1.23	-0.03	1.15
56276	26.1	4.29	-0.35	2.16	-0.19	2.05
S1004	29.6	3.71	-3.58	4.51	-2.53	3.50
S1008	27.6	4.60	-0.80	1.17	1.39	1.95
S1011	26.5	4.65	-0.91	2.97	-0.87	2.98
S1013	27.7	4.94	-1.02	1.46	-0.89	1.44
S1015	23.0	6.17	3.85	5.38	3.90	5.41
S1017	28.2	4.31	-2.54	2.90	-2.50	2.87
S1018	26.8	6.01	-1.42	2.03	-1.38	2.02
S1019	27.9	4.97	-1.60	1.92	-1.18	1.36
S1020	27.9	5.90	-2.58	2.90	-2.50	2.79
S1021	26.0	5.14	0.16	1.74	0.35	1.79
S1023	27.9	5.42	-2.02	2.28	-1.87	2.13
S1024	27.1	6.12	-1.50	2.32	-1.42	2.25
S1025	27.2	4.69	-1.41	2.09	-1.39	2.07
S1027	28.8	5.09	-2.29	2.50	-2.17	2.41
S1028	27.8	4.65	-3.50	4.57	-3.52	4.58
S1029	27.6	4.42	-0.11	1.94	0.02	1.91
S1033	28.3	5.21	-1.19	1.60	-0.99	1.44
S1034	27.2	5.97	-1.47	2.18	-1.47	2.20
S1035	27.5	5.25	-2.00	2.43	-1.79	2.21
S1036	27.1	5.08	-1.51	1.89	-1.50	1.92
S1041	28.1	5.02	-1.35	1.54	-1.02	1.17
平均值	27.3	4.82	-1.13	2.28	-0.42	2.24

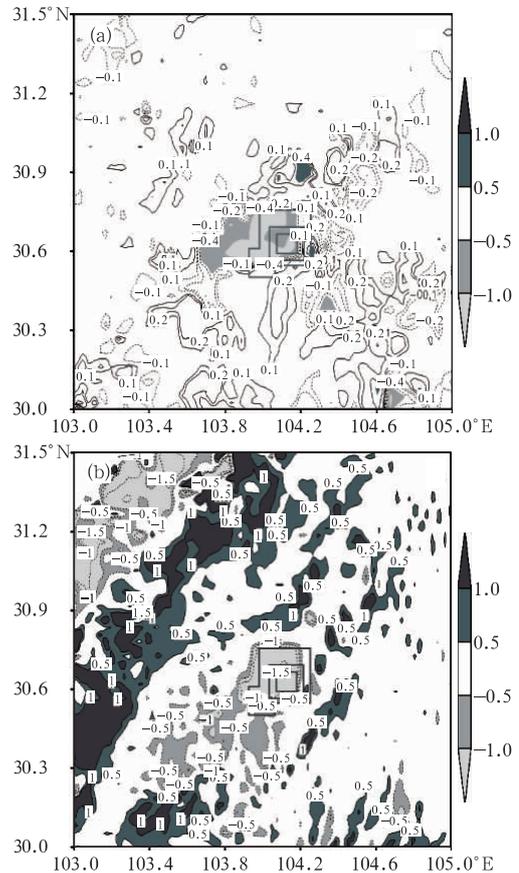


图 14 NewExp 与 OldExp 的 10 m 全风速差分布
(a) 6 日 02 时; (b) 6 日 14 时(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
阴影区的风速差绝对值在 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上

Fig. 14 The 10 m wind speed difference between
NewExp and OldExp at (a) 02:00 BT 6 July and
(b) 14:00 BT 6 July 2008 (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
absolute value of wind difference in shaded
area is above $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

3.3.3 地面流场和低层大气垂直结构

OldExp 和 NewExp 对 6 日 02 时 10 m 风场模拟的结果很接近,从风矢量场几乎看不出差别,10 m 风的方向几乎是完全一致的,6 日 14 时的风场虽然和 02 时不一样,但是两个试验的模拟结果也很相似(图略)。从图 14 可以看出两个试验在 10 m 全风速上有差别。在 6 日 02 时,OldExp 和 NewExp 10 m 全风速相差较小,它们最大的区别出现在成都城区,NewExp 的 10 m 全风速比 OldExp 普遍小了 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大风速差达到 $-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。在 6 日 14 时,地面湍流混合作用增强,NewExp 与 OldExp 的 10 m 全风速差比夜间 02 时加大,风速差绝对值达到 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围扩大,成都城区风速差普遍达到 $-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,NewExp 与 OldExp 的最大 10 m 全风速差达到 $-1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。可见城市冠层模式反映出由于城市中建筑物的增多,城区下

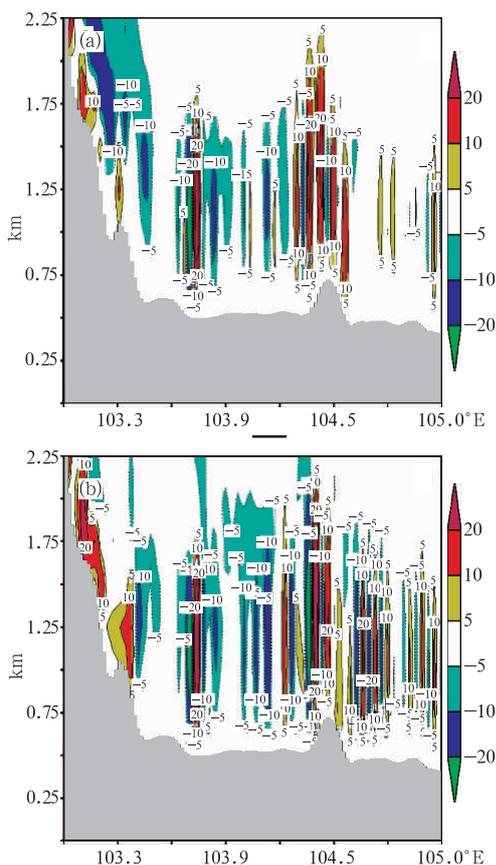


图15 2008年7月6日14时沿 30.64°N , 2.25 km 以下垂直风速的剖面图,黑色直方柱为地形高度
(a) OldExp; (b) NewExp (单位: $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)

图下方的横线表示城区的位置

Fig. 15 Vertical wind section below 2.25 km along 30.64°N at 1400 BT 6 July 2008 for (a) OldExp, and (b) NewExp (unit: $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
black bin is terrain height, horizontal line at bottom shows the location of city

垫面粗糙度增大,地面摩擦和拖曳作用增强,导致城区10 m风速减小。

在6日14时,NewExp模拟的垂直速度在成都城区主要为负,即城区上空主要为下沉气流(图15b)。OldExp在城区除了有下沉气流,还有弱的上升气流(图15a)。这可能与OldExp模拟的城区地表水汽蒸发比NewExp大有关,水汽含量大有利于促进近地层的弱对流产生。在 104.6°E 以东,OldExp模拟的垂直运动很弱,而NewExp模拟的正负速度交替,即存在弱的局地垂直环流圈。可见,城区建筑物的增多,使地表粗糙度增大,由于拖曳作用,在城区下风方向,局地垂直环流加强。

5 结论和讨论

城市化的发展使原有的土地利用资料已不能正

确反映下垫面信息,利用google earth卫星和成都市气象局提供的地理信息资料,本文将成都地区土地利用资料更新为33类,其城区面积明显扩大;同时在WRF模式中耦合了单层城市冠层模式,并根据成都城市建筑的特点,对城市冠层部分参数进行了调整,从而形成了成都地区精细下垫面资料。使用该精细下垫面资料积分WRF模式,对2008年7月一次晴空背景下的天气特征进行了模拟,并和使用旧土地利用资料以及slab模式的WRF模式模拟结果进行比较,从而对成都城市气象特征进行了细致的分析。精细下垫面资料比原有资料能更好地反映了城市热岛、干旱岛等气象特征。以下是本文的主要结论:

(1) 成都精细下垫面资料真实反映出城区面积的扩大,使用精细下垫面资料的WRF模拟结果显示,城区因为不透水下垫面的增加,使得城市地表蒸发和水汽通量显著减小,潜热通量减小,感热通量增加。

(2) 耦合单层城市冠层模式的WRF模拟结果表明建筑物能截获长波辐射,使到达地表的长波辐射增加,而建筑物对短波辐射无明显截获作用,由于它模拟的热力作用增强,因而比用slab模式的WRF模拟的湍流作用更强,边界层高度增高。

(3) 成都城区存在明显的热岛效应,使用精细下垫面资料和使用旧土地利用资料都能模拟出成都的热岛效应,前者热岛效应比后者强 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$,它反映出城区面积扩大使城市热岛效应增强。

(4) 使用精细下垫面资料和耦合单层城市冠层模式后,WRF模拟的2 m温度负偏差减小,均方根误差也略微减小,它能更准确地预报2 m温度。

(5) 使用精细下垫面资料和耦合单层城市冠层模式的WRF比使用旧土地利用资料和slab模式的WRF模拟的城区10 m全风速更小,城区建筑物的增多,加大了地面粗糙度,拖曳作用使城区下风方垂直环流增强。

参考文献

- [1] 邓建胜. 我国城市化率达44.9%[N]. 人民日报, 2008-07-17.
- [2] 王祥荣. 生态与环境—城市可持续发展与生态环境控制新论[M]. 南京: 东南大学出版社, 2000.
- [3] 司鹏, 李庆祥, 李伟. 城市化进程对中国东北部气温增暖的贡献检测[J]. 气象, 2010, 36(2): 13-21.
- [4] 王喜全, 王自发, 齐彦斌, 郭虎. 城市化与北京地区降水分布变化初探[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(4): 489-495.
- [5] 邓玉娇, 匡耀求, 黄锋. 基于Landsat/TM资料研究广州城市热岛现象[J]. 气象, 2010, 36(1): 26-30.
- [6] 葛伟强, 周红妹, 杨何群. 基于MODIS数据的近8年长三角

- 城市群热岛特征及演变分析[J]. 气象, 2010, 36(11): 77-81.
- [7] 程玉琴, 张少文, 尤莉, 等. 城市热岛效应和迁址对赤峰站温度的影响[J]. 气象, 2009, 35(12): 96-101.
- [8] Hjelmfelt M R. Numerical simulation of the effects of St. Louis on mesoscale boundary-layer inflow and vertical air motion: simulations of urban vs non-urban effects[J]. J Appl Meteor, 1982, 21, 1239-1257.
- [9] 蒙伟光, 闫敬华, 扈海波. 城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响[J]. 大气科学, 2007, 31(2): 364-376.
- [10] Huff F A, Changnon S A. Precipitation modification by major urban areas[J]. Bulletin American Meteorological Society, 1973, 54(12): 1220-1232.
- [11] Taha H. Modifying a mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage: A bulk parameterization approach[J]. J Appl Meteorol, 1999, 38: 466-473.
- [12] Oke T R. Boundary Layer Climate[M]. London: Methuan & Co. LTD. 1987: 274.
- [13] Kusakah, Kondoh, Kikegaway, 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: 329-358.
- [14] Kondoh, Liu F H. A study on the urban thermal environment obtained through one-dimensional urban canopy model[J]. Japan Soc Atmos Environ, 1998, 33: 179-192 (in Japanese).
- [15] Kondoh, Kikegaway, Genchi Y, et al. Heating in the urban canopy by anthropogenic energy use[C]. Proceedings of 15th International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology (ICB-ICUC'99), Sydney, Australia, November 8-12, 1999, ICB-ICUC, in CD-ROM.
- [16] Vu T C, Asaeda T, Ashie Y. Development of a numerical model for the evaluation of the urban thermal environment[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 1999, 81: 181-191.
- [17] Masson V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models[J]. Boundary-Layer Meteorol, 2000, 94: 357-397.
- [18] Baklanova, Rasmussian A, Fay B. Possibilities and shortcoming of NWP model to provide meteorological data for UAP forecasting[C]. Proceedings of Urban Air Quality Conference, Louraki Greece. 2001.
- [19] 张朝林, 苗世光, 李青春, 等. 北京精细下垫面信息引入对暴雨模拟的影响[J]. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1372-1382.
- [20] Jeff C F Lo, Alexis K H. Lau, Fei Chen, et al. Urban modification in a mesoscale model and the effects on the local circulation in the Pearl River Delta Region[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46(4): 457-476.
- [21] 孙晓岭. 试论 BOT 项目在我国的运作及对策——成都市自来水六厂 BOT 项目案例分析[D]. 西南财经大学优秀硕士论文, 2001.
- [22] 林朗. 成都地区居住建筑注重生态的设计策略研究[D]. 清华大学优秀硕士论文, 2005.
- [23] 陈起英, 姚明明, 王雨. 国家气象中心新一代业务中期预报模式 T213L31 的主要特点[J]. 气象, 2004, 30(10): 16-21.
- [24] 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]. J Appl Meteor, 2004, 43: 1899-1910.
- [25] Teddy Holt and Julie Pullen. Urban canopy modeling of the New York City Metropolitan Area: A comparison and validation of single- and multilayer parameterizations[J]. Monthly Weather Review, 2007, 135(5): 1906-1930.
- [26] 高志球, 卞林根, 逯昌贵, 等. 城市下垫面空气动力学参数的估算[J]. 应用气象学报, 2003, 13: 26-33.
- [27] Kusaka H, Kimura F. Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case[J]. J Meteor Soc Japan, 2004: 82: 67-80.
- [28] 郝丽萍. 成都市近 50 年气候变化特征及其热岛效应研究[D]. 南京: 南京信息工程大学气象学系, 2006.