

姚豫奇, 张宇, 曾钰婷, 等. 2020. 成都地区城市化对气候影响的模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 25(3): 240–252. YAO Yuqi, ZHANG Yu, ZENG Yuting, et al. 2020. Simulation Study of Urbanization Impact on Climate in Chengdu [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (3): 240–252. doi:[10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19182](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19182)

成都地区城市化对气候影响的模拟研究

姚豫奇 张宇 曾钰婷 杨林峰 周可

成都信息工程大学大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225

摘要 为了研究成都地区城市化对当地气候的影响, 利用不同时期的下垫面土地利用类型数据和耦合单层城市冠层模型 (UCM) 的 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式对成都夏季和冬季城市化效应进行了模拟研究, 得到以下主要结论: 1) 成都地区城市化使夏季城区上空出现增温区域。城区地表气温升高约 2.8°C , 边界层高度升高约 150 m, 冬季地表气温平均升高约 0.6°C , 边界层高度升高约 25 m。夏冬两季气温日较差均减小。2) 受城市化影响, 成都地区夏季和冬季 2 m 相对湿度减小, 感热通量增加, 潜热通量减小, 且夏季变化程度强于冬季。3) 城市化使地表的粗糙度增加, 进而使夏季和冬季风速在城区减小, 减小约 $0.1\text{--}0.6 \text{ m s}^{-1}$, 但夏季风速减小区域较冬季更大。城市化还使城市上空低层散度减小, 辐合作用增强, 垂直速度增大, 夏季水汽往高层输送明显。4) 夏季, 城市化作用使日平均和白时段降水量在城区的迎风区和下风区均增加, 夜间降水量在下风区域增加, 对迎风区域影响不明显。

关键词 城市化 下垫面 区域气候 数值模拟

文章编号 1006-9585(2020)03-0240-13

中图分类号 P461⁺.8

文献标识码 A

doi:[10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19182](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19182)

Simulation Study of Urbanization Impact on Climate in Chengdu

YAO Yuqi, ZHANG Yu, ZENG Yuting, YANG Linfeng, and ZHOU Ke

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology/Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225

Abstract To study the impact of urbanization on the local climate in Chengdu, the urbanization effects during summer and winter over Chengdu are simulated by using data about the underlying surface land use type of different periods and the WRF (Weather Research and Forecasting) model, coupled with a single-layer urban canopy model (UCM). The main conclusions are drawn as follows. First, in summer, the urbanization of Chengdu causes a temperature-increasing area over the urban area. The surface temperature increases by about 2.8°C in the urban area, and the boundary layer height increases by about 150 m. In winter, the surface temperature increases by about 0.6°C in the urban area, and the boundary layer height by about 25 m. In addition, the diurnal temperature range in both summer and winter decreases. Second, during summer and winter, the 2-m relative humidity decreases, while the sensible heat flux increases and the latent heat flux decreases due to the impact of urbanization, but the degree of change in summer is stronger than in winter. Third, during both seasons, the wind speed decreases by around $0.1\text{--}0.6 \text{ m s}^{-1}$ in the urban area due to an increase in surface roughness, but the area where the wind speed decreases in summer is larger than in winter. Due to urbanization, in the

收稿日期 2019-12-03; 网络预出版日期 2020-04-09

作者简介 姚豫奇, 男, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事陆面过程分析及模拟研究。E-mail: 894059953@qq.com

通讯作者 张宇, E-mail: yuzhang@cuit.edu.cn

资助项目 四川省科技厅应用基础研究自由探索项目 2019YJ0408, 成都信息工程大学科研项目 KYTZ201721

Funded by Applied Basic Research Free Exploration Project of Sichuan Science and Technology Department (Grant 2019YJ0408), Research Project of Chengdu University of Information Technology (Grant KYTZ201721)

lower atmosphere over the city, divergence decreases, convergence and vertical velocity increases, while water vapor is transported significantly from the lower layer to the upper layer in summer. Finally, during summer, because of urbanization, the average daily precipitation and daytime precipitation both increase in the urban upwind and downwind directions. On the other hand, nighttime precipitation increases in urban downwind areas, but it has no significant effect on urban upwind areas.

Keywords Urbanization, Underlying surface, Regional climate, Numerical simulation

1 引言

21世纪以来,全球经济保持快速增长、科技不断进步,从而大力推动了城市化的进程。作为发展中国家,改革开放以来,我国的城市化率也迅速升高,从1978年的17.9%发展到了2017年58.52%的水平,并且现在城市规模保持迅速扩张趋势(臧良震和苏毅清,2019)。

城市化是一种极端的土地利用/覆盖变化,会导致城市原有的自然下垫面被由钢筋、水泥、沙石等坚硬、干燥、不透水的材料所替换,这一方面会改变下垫面的物理属性,使得下垫面热容量增加,从而使城市气温高于其附近的郊区气温,产生热力差异,进而影响环流(Oke, 1982; Shepherd, 2005; Mahmood et al., 2014);另一方面伴随城市化会出现很多高大的建筑物,建筑物风格各异,其三维结构会影响下垫面对太阳短波、地面和大气间长波辐射的传输,并且由于建筑物分布不均,高低、形态各异,会增大地表粗糙度,对低层大气的拖曳作用增强,也会加强边界层的湍流作用,进而形成独特的城市气候(Weaver and Avissar, 2001; Emmanuel and Krüger, 2012; Kleerekoper et al., 2012)。因此,对城市天气以及气候的研究就显得尤为重要,它可以为经济和环保决策等提供重要的理论依据,具有重要的现实意义。

对于城市气候的研究最早是19世纪初期,Howard观测发现伦敦城区比郊区温度高(史军等,2011),此后,开启了各国学者对城市气候的研究,19世纪中叶,Manley(1958)将城区温度高于郊区这一现象命名为“热岛效应”。Oke根据多次观测数据,概括出了“城市热岛”概念图(Arnfield, 2003)。随着城市化进程深入而快速发展,城市面积不断扩大,城市热岛效应也越来越被人们所重视,对城市气候的研究迅速增多,主要有两种方法,一种是利用某一城市或城市群与其附近郊区的观测资料或者卫星资料进行对比分析城市气候效应,

Jones et al. (1990)对苏联西部、澳大利亚东部和我国东部进行了研究,在半球尺度上分析了城市化的影响,Wang et al. (1990)使用中国城市和农村的观测资料进行对比,分析了城市气候效应,Ren et al. (2008)利用我国华北地区282个测站数据分析城市化对地表气温的影响。另一种是使用数值模式,来研究城市化对区域气候或天气的影响,陈海山和张叶(2013)利用全球大气环流模式CAM4.0,探讨了中国东部大规模城市化对东亚冬季风的可能影响,李欣等(2011)利用WRF模式,重点对长三角城市群引起的多城市热岛及地表能量平衡和日变化特征进行了分析,Chen et al. (2014)和Chen et al. (2016)等利用WRF模式结合城市冠层模型分别对我国杭州地区和南京地区城市热岛效应进行了分析。

成都市位于我国四川盆地西部、青藏高原的东部,成都平原中部,独特的地理环境形成成都独特的气候特征,它又是西南地区的经济、科技、商贸、交通中心,也是西部大开发战略的关键平台,自改革开放以来,成都市进入快速城市化时期。城市规模不断扩大会带来一系列的气候问题——热岛、干岛、雨岛等,这已经对人们的生活产生了影响(Oleson et al., 2015),因此研究成都城市化对区域天气和气候的影响就显得尤为重要,已经有学者对此进行了研究(但尚铭等,2009;肖丹等,2011;程志刚等,2016)。但已有的研究大多是针对单一季节或者某一天气时段进行研究,或者是利用站点资料进行统计分析,并没有对成都城市化对区域气候影响的季节变化进行深入的研究,研究要素较为单一,较少涉及热岛的成因及影响因子,且观测研究往往集中在几个代表站,在空间分析上会有一定的不足。所以本文以成都为研究区域,采用高分辨率的中尺度模式(WRF),结合城市冠层模型(UCM),从城市化进程入手,通过使用不同时期的城市下垫面资料,对成都地区进行模拟研究。

模拟时间选为2016年1月(代表冬季)和7

月（代表夏季）。2016年是强 El Niño 衰减年，我国的气候异常，极端天气事件频发，西伯利亚高压偏强，东亚冬季风偏强，夏季风偏弱，南海夏季风爆发偏晚，爆发强度偏弱，高原季风偏弱，夏季西北太平洋副热带高压的强度偏强，西伸脊点的位置显著偏西，全国平均气温偏高，平均降水量为历史最多，但西南雨季开始和结束时间均偏早，雨量偏少，成都地区年降水量和夏季降水量较往年偏低（梅梅等, 2017; 王梫轩等, 2019; 王奕丹等, 2019; 赵小芳等, 2019），特殊的气候背景也会对成都的气候产生影响，本文首先对模式的模拟能力进行验证，其次对城市扩张在典型季节对区域气候的影响程度及机制进行分析，量化成都城市化对气象要素的影响，为之后的研究提供一定的参考。

2 资料和模拟方案设计

2.1 资料选取

实测资料来自 2016 年 1 月和 7 月成都市 14 个地面观测站，气象要素主要包括逐日平均气温、相对湿度和风速观测资料，用来和模式输出数据进行对比，评估模式的模拟能力。

模式的初始和边界条件均来自 NCEP 的 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度) 的每天 4 次再分析资料，资

料时段为 2016 年 7 月 1~31 日（代表夏季）和 2016 年 1 月 1~31 日（代表冬季）。

成都市城市化进程在 2000~2010 年最为剧烈，所以为了对成都城市化效应进行研究，下垫面土地利用/覆盖类型数据使用“大尺度土地利用/覆盖的区域气候效应”全球变化重大研究计划项目的 2000 年和 2010 年的东亚地区的数据集，该数据以 IGBP 的 17 类为基础，又进一步把耕地分为水田和旱地，并且增加苔原，形成 19 类土地利用/覆盖类型，该数据整体精度较其他产品高 (Yang et al., 2017; Li et al., 2017)。

2.2 模拟区域及参数化方案

所用模式为中尺度模式 WRFV3.9.1 版本，模拟区域以成都市中心 (30.67°N , 104.06°E) 为模拟中心，采用三重嵌套，嵌套区域的范围如图 1 所示，最内层为成都地区，网格分辨率为 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ ，中间层网格分辨率为 $6\text{ km} \times 6\text{ km}$ ，最外层网格分辨率为 $18\text{ km} \times 18\text{ km}$ ，垂直方向是从地表到高空 50 hPa ，分为 30 层。

数值试验的主要参数化方案包括：微物理过程采用 Lin 方案，积云参数化方案采用 KF 方案（第三层嵌套分辨率小于 5 km ，不设置积云方案），长波辐射方案采用 RRTM 方案，短波辐射方案采用 Goddard 方案，边界层方案采用 MYJ 方案，陆

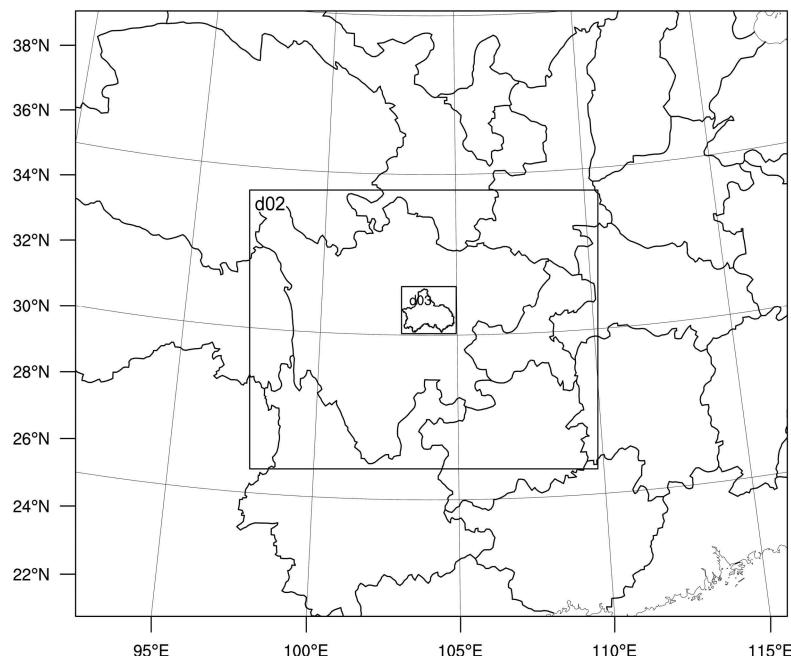


图 1 WRF 模式模拟的 3 层嵌套区域

Fig. 1 Configuration of the three nested domains for WRF simulation

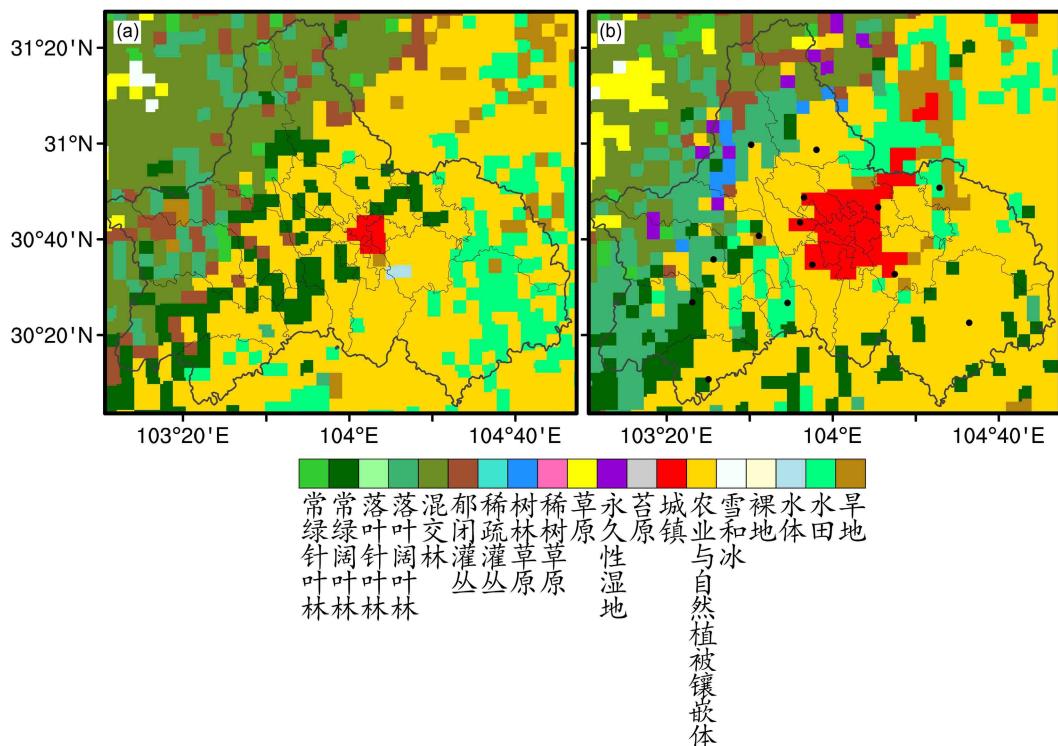


图2 (a) 2000年和(b) 2010年成都地区土地利用类型(黑点为台站位置)

Fig. 2 Types of land use in Chengdu in (a) 2000 and (b) 2010 (black dot is the location of the station)

面过程为 Noah land-surface 方案, 城市冠层方案采用由 Kusaka et al. (2001) 开发的单层城市冠层方案 (SLUCM) (Ryu et al., 2011)。

本次试验利用 2010 年和 2000 年成都地区的下垫面土地利用/覆盖类型资料替代 WRF 模式原有的土地利用/覆盖类型数据进行试验, 试验 1 (简称 OldExp) 最内层采用 2000 年土地利用/覆盖类型数据, 试验 2 (简称 NewExp) 最内层采用 2010 年土地利用/覆盖类型数据, 其余两层均使用 2000 年的下垫面土地利用数据, 两组试验除下垫面土地利用/覆盖类型数据不同, 其余参数和参数化方案均相同。

从成都地区 2000 年和 2010 年土地利用类型 (图 2)、2000 年和 2010 年研究区主要土地利用/覆盖类型面积 (表 1) 可以看出, 2010 年在成都西部和西北部地区主要土地利用类型仍然为绿色植被, 但是不同类型植被覆盖面积有所改变, 其中落叶阔叶林在成都地区面积大幅度增加, 增加面积为 1228 km², 树林草原和草原面积也有所增大; 在德阳地区, 部分农业自然植被镶嵌体变为水田、旱地和小部分城镇; 成都水田面积减小 648 km², 减小区域主要在简阳和金堂地区; 成都市中心主要变化

是部分农业与自然植被镶嵌体和常绿阔叶林变为城镇, 2000 年城镇面积为 172 km², 2010 年城镇面积达到 1100 km², 10 年间, 城镇面积变为先前的 6.4 倍。

3 模拟结果验证

为了验证模式的模拟能力, 使用成都市地面站点的 2 m 气温、10 m 风速和 2 m 相对湿度的观测

表 1 2000 年和 2010 年研究区主要土地利用/覆盖类型面积
Table 1 Areas of major land use/cover types of the study area in 2000 and 2010

km²

土地覆盖类型	面积		
	2000年	2010年	变化面积
常绿阔叶林	1924	1300	-624
落叶阔叶林	684	1912	1228
混交林	1904	1024	-880
郁闭灌丛	888	264	-624
树林草原	0	216	216
城镇	172	1100	928
农业与自然植被镶嵌体	6700	6960	260
水田	1536	888	-648

表 2 成都地区气温、相对湿度、风速的观测和模拟平均值、平均误差及均方根误差**Table 2 Mean values, mean errors, and root-mean-square errors between simulated and observed values in temperature, relative humidity, and wind speed in Chengdu**

		平均值			
		观测	模拟	MB	RMSE
1月	温度	6.40℃	7.08℃	0.68	1.47℃
	相对湿度	76.91%	63.67%	-13.24	16.36%
	风速	1.40 m/s	2.53 m/s	1.13	1.56 m/s
7月	温度	26.85℃	28.47℃	1.62	2.49℃
	相对湿度	82.02%	69.36%	-12.66	15.86%
	风速	1.54 m/s	3.07 m/s	1.53	1.93 m/s

数据与模拟结果进行对比（表 2），可以看出，温度模拟与观测相比，冬季和夏季都出现正偏差，冬季站点的平均偏差为 0.68℃，均方根误差为 1.47℃；夏季平均偏差为 1.62℃，均方根误差为 2.49℃；相对湿度的模拟整体偏低，冬季平均偏差为 -13.24%，夏季为 -12.66%，这可能是由于实际情况中成都地区水汽来源丰富，模式中产生系统偏差的原因；对风速的模拟有所高估，冬季成都区域平均偏差为 1.13 m s^{-1} ，夏季为 1.53 m s^{-1} 。整体而言，模拟的结果与实测数据大致相符，可以反映出当地的气象要素特征。

4 对平均气象场的影响

4.1 城市化对温度和边界层高度的影响

城市化会使城市下垫面的地表反照率、热容量以及热传导率发生显著改变，而这些变化会直接对城区地表气温产生影响，图 3 是成都城市化夏季和冬季模拟期间地表温度、气温日较差、边界层高度差异的空间分布。从图 3a 和 3b 可以发现，城市化在夏季和冬季均使城区气温明显升高，与图 2 的土地覆盖类型对比可以发现，温度升高的区域和城市扩张区域具有较高的一致性，但是冬夏两季升温数值具有较大的差异，夏季城区升温区域平均升温约 2.8℃，最高值区域在武侯区和新都区中部靠近金牛区附近，最高升温超过 3.5℃，而冬季城市扩张区平均升温约 0.6℃，最大值区域在城区东南部的龙泉驿地区，最大约 1.7℃，夏季平均升温约为冬季的 4.7 倍，这是因为冬季太阳辐射较夏季小，且成都地区冬季多雾霾天气，能到达地面的太阳辐

射较夏季大大减小，城市化升温作用没有夏季显著，Zhang et al. (2010) 和 Du et al. (2007) 对长江三角洲城市化对气候的影响研究也都表明城市化对地表温度的影响在夏季比冬季强。

同样，城市化对城区气温日较差也会产生影响 (Lin et al., 2009)，从图 3c 和 3d 可以看出，夏季和冬季城区的气温日较差都明显减小，夏季气温日较差减小区域主要在成都市中心、龙泉驿和简阳部分区域，最小值在城区东南部的龙泉驿地区，减小约 0.85℃，冬季减小区域面积较夏季大，整个城区及其附近区域均减小，最大减小约 0.6℃。城市化会使城市区域最高气温和最低气温均升高，气温日较差的减小说明城市化的升温作用对最低气温的影响更大。

城市化引起的升温作用会使湍流增强，进而也会使边界层高度升高 (Lin et al., 2008)，从图 3e 和 3f 可以看出，边界层高度的变化区域及大值区域与气温变化区域相似，主要集中在城市地区，夏季城区边界层高度平均升高约 150 m，冬季由于城市化的升温作用较弱，引起的湍流较弱，所以边界层高度升高范围较小，仅在城区内部部分区域有所升高，平均升高约 25 m。

为了研究城市化对城区及其附近地区上空温度场的影响，沿城区中心纬度剖面（图 4）。可以明显看到，城市化后，夏季在城区及其附近地区上空会形成一个升温区，最大升高约 0.6℃，而在冬季，成都地区多阴雨、多云天气，且伴随污染，太阳辐射较少，城市化升温作用较弱，在城区上空并未有明显变化。

4.2 城市化对水汽和能量的影响

相对湿度的变化可以反映出水汽的分布情况，地面温度的增加和水汽的减小都对相对湿度的变化产生影响，而城市下垫面具有透水性、储水性极差的特性，无法像普通地面一样通过土壤和植被来储存水分，并且温度高、湍流作用强，会把水汽向上输送，增加地表水汽的蒸发，导致地表水汽减小，出现“干岛”效应 (Li et al., 2015)。如图 5 所示，夏季，相对湿度在城区及其周边地区显著减小，在城区平均减小 11%，冬季城市化对相对湿度的影响程度较夏季显著减小，相对湿度平均减小约 3%，肖丹等 (2011) 研究也发现城市化会使成都城区夏季相对湿度减小，形成“干岛”。城市化也会影响城市上空的水汽分布，从图 6 看，夏季成都城区上

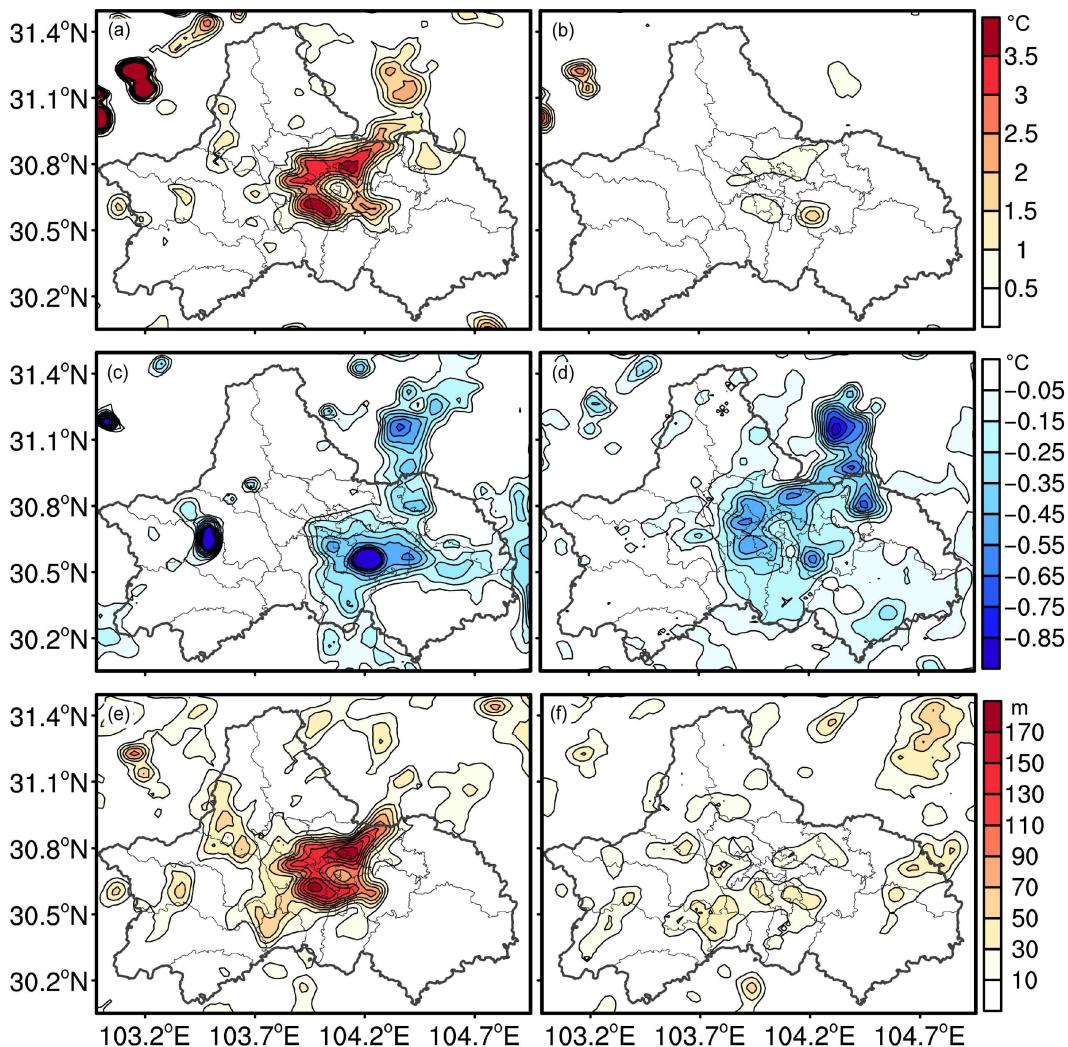


图3 成都城市化夏季(左列)和冬季(右列)(a、b)地表温度、(c、d)气温日较差、(e、f)边界层高度差异的空间分布(NewExp—OldExp)

Fig. 3 Spatial difference distribution of (a, b) surface temperature, (c, d) daily temperature difference, and (e, f) boundary layer height in Chengdu's urbanized area in summer (left panel) and winter (right panel) (NewExp—OldExp)

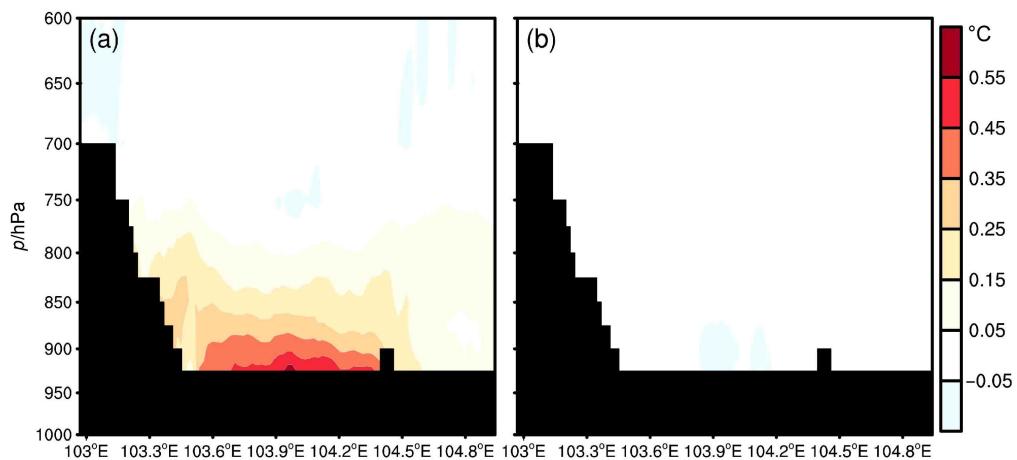


图4 成都城市化(a)夏季和(b)冬季沿30.67°N温度差异的剖面(黑色为地形高度)(NewExp—OldExp)

Fig. 4 Vertical temperature differences over the urbanized area (30.67°N) of Chengdu in (a) summer and (b) winter (terrain height shown in black) (NewExp—OldExp)

空形成了一个水汽减小区域，干岛效应明显，最大减小值为 0.8 g kg^{-1} ，在西部城区 103.98°E 附近上空约 770 hPa 处形成一个水汽增长区域，这是由于城市化使边界层高度升高，地表湍流增强，进而使低层水汽输送到上层；冬季由于城市化效应较弱，近地面升温极不明显，使垂直方向湍流大大减弱，城市上空水汽仅在部分区域略有减小。

城市下垫面是由钢筋水泥等组成的高密型地表，水分含量较少，对地表能量也会产生影响（[郑祚芳等, 2012; Feng et al., 2012; Chen et al., 2016](#)）。从城市扩张后潜热、感热、地表热通量差异的空间分布（图 7）可以看出，由于城市化使水分含量减小，所以在夏季和冬季城区潜热通量均减小，夏季平均减小约 110 W m^{-2} ，有两个潜热通量减小极其显著的区域，一个在郫都区东南部、新都区中部及金牛区附近区域，另一个在武侯区及其附近区域，最大减小值超过 120 W m^{-2} ，冬季潜热通量减小值较夏

季小，城区平均减小约 22 W m^{-2} 。感热通量的数值变化与潜热通量相反，夏季在城区显著增大，平均增大约 47 W m^{-2} ，大值区域和潜热变化大值区域相同，最大值超过 65 W m^{-2} ，而冬季感热通量整体变化不大，仅在龙泉驿部分区域有所增加，无论是感热通量还是潜热通量，夏季变化都比冬季变化大，这是因为夏季太阳高度角较冬季大，太阳辐射较强，会有更多的太阳辐射被吸收，进而使地面升温高，水分减少大，其次是由于成都冬季具有独特的气候特征，多阴雨天气，太阳辐射就更难被吸收，所以冬季感热通量变化较小。夏季地表热通量仅在城区的部分区域有所增加，在龙泉驿区有大值区，冬季地表热通量除在龙泉驿区有增大区域外，城区其他地区均减小，这是由于该地区下垫面是由水体变为城镇，水体具有更大的热容量。

4.3 城市化对地表风场及低层垂直环流的影响

随着城市化的发展会出现很多风格各异且不均

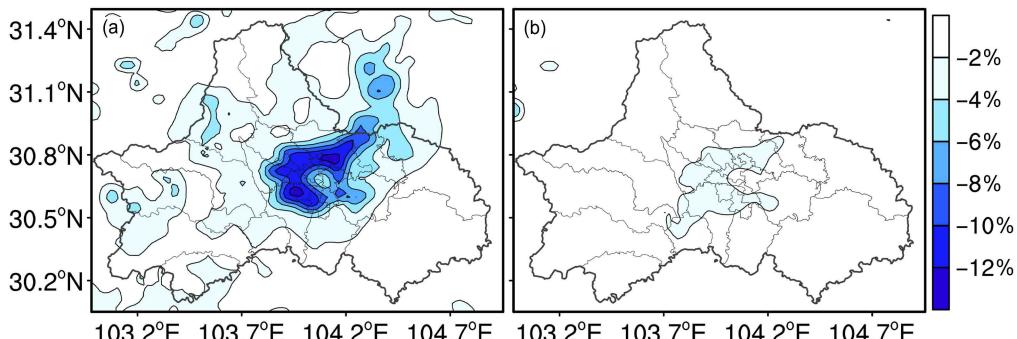


图 5 成都城市化（a）夏季和（b）冬季 2 m 相对湿度差异的空间分布（NewExp—OldExp）

Fig. 5 Spatial difference distribution of 2-m relative humidity in Chengdu's urbanized area in (a) summer and (b) winter (NewExp—OldExp)

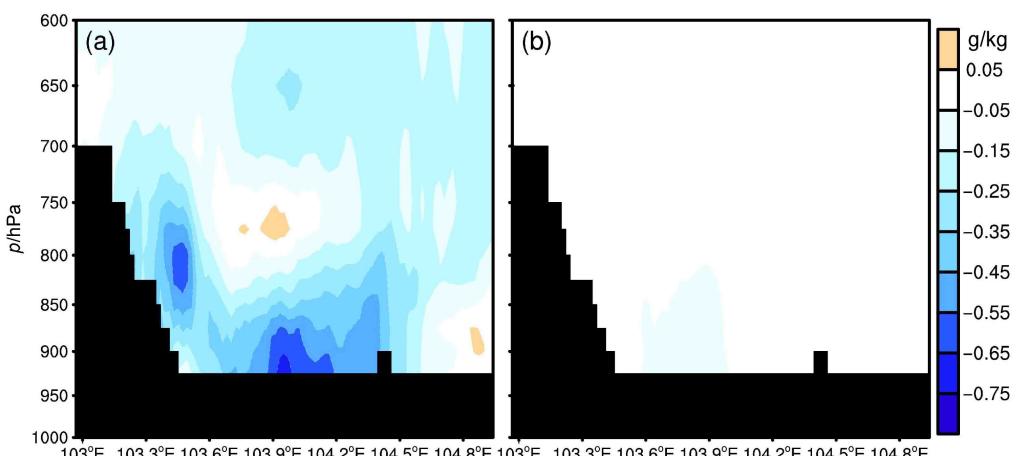


图 6 成都城市化（a）夏季和（b）冬季沿 30.67°N 水汽混合比差异的剖面（黑色为地形）（NewExp—OldExp）

Fig. 6 Differences in water vapor mixing ratio over the urbanized area (30.67°N) of Chengdu in (a) summer and (b) winter (terrain height shown in black) (NewExp—OldExp)

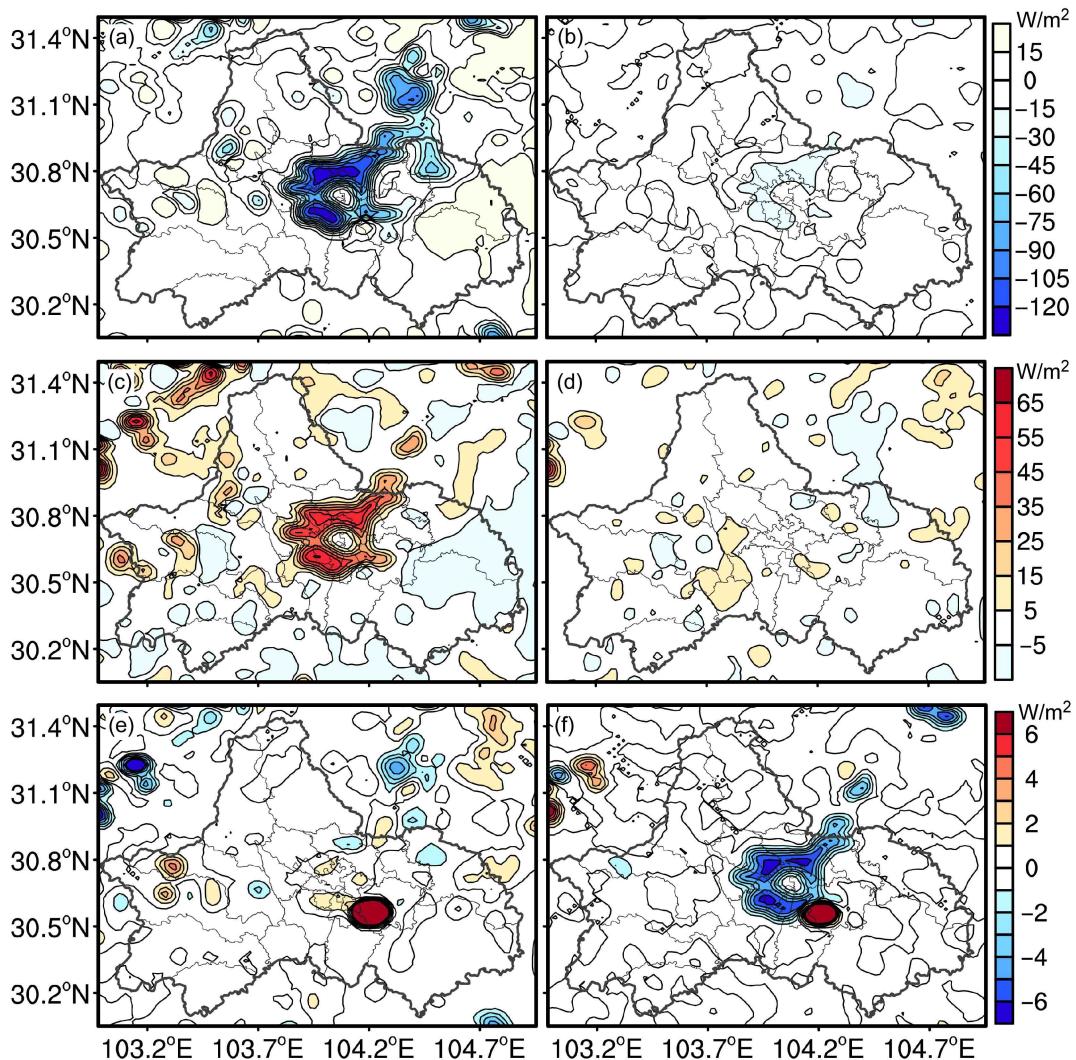


图 7 成都城市化对夏季(左列)和冬季(右列)(a、b)潜热通量、(c、d)感热通量、(e、f)地表热通量差异的空间分布(NewExp—OldExp)

Fig. 7 Spatial difference distribution of (a, b) latent heat fluxes, (c, d) sensible heat fluxes, and (e, f) surface heat fluxes in Chengdu's urbanized area in summer (left panel) and winter (right panel) (NewExp—OldExp)

匀分布的建筑物, 改变了地表的均匀性, 进而增大地表粗糙度, 随之产生摩擦效应, 会导致地表风速的减小, 并且由于高大建筑物的阻挡, 也会产生绕流作用(徐阳阳等, 2009; Zhang et al., 2010; Yu et al., 2012; Lai et al., 2016)。从夏季和冬季10 m风速差值分布(图8a和8b)可以看出, 夏季和冬季风速减小区域与城市下垫面扩张区分布具有较高的一致性。在城市扩张区, 夏季风速减小约 $0.1\sim0.6 \text{ m s}^{-1}$, 减小的大值区域出现在成都城区西南部的武侯区、锦江区和双流区, 冬季风速平均减小值与夏季相似, 但减小区域较夏季小, 这是由于夏季风速较冬季大, 产生绕流作用, 使城区的下风方向风速也有所减小。城市化也会进一步对散度产生影

响, 图8c和8d散度变化可以发现, 夏季在成都的新都区、武侯区、锦江区、温江区、双流区北部和郫都区东南部及附近区域都有明显的散度减小区, 其中在新都区减小值最大, 而冬季在城中心、新都区及城区东部的龙泉驿部分区域散度降低, 在郫都区、金牛区、温江区及双流区东北部附近地区散度有所增大。这是因为城市化使地表温度和边界层高度升高, 进而使湍流加强, 低层大气辐合作用增强, 有利于对流的发展和水汽向高层输送。

图9中城区上空的散度剖面可以看出, 夏季和冬季在城区上空低层散度均有所减小, 夏季散度减小区域主要出现在城市的扩张区域上空(103.98°E 和 104.3°E 附近), 最大值出现在 103.98°E 附近上

空，冬季散度减小区域出现在城区的中、东部 104.1°E 附近地区，与冬季散度差值水平分布（图 8d）中散度在城区中心附近减小相符，城区上空散度减小使低层辐合加强，进而使该区域垂直速度增大，从图 10 可以看出，夏季和冬季垂直速度增加区域主要出现在城市的扩张区 (103.98°E 和 104.3°E 附近)，夏季垂直速度增加的大值区在

104.3°E ，最大增加了 3.2 cm s^{-1} ；冬季垂直速度增加较夏季小，最大增加约 2 cm s^{-1} 。垂直速度的增大，会加强对流发展，进而把低层的水汽输送到高层，与图 6a 夏季水汽混合比剖面相符。总体而言，城市化的发展改变了下垫面的热力属性，使城区散度减小，垂直速度增加，进而把水汽由低层运输到上层，且夏季由于太阳辐射强，城市地表热量变化

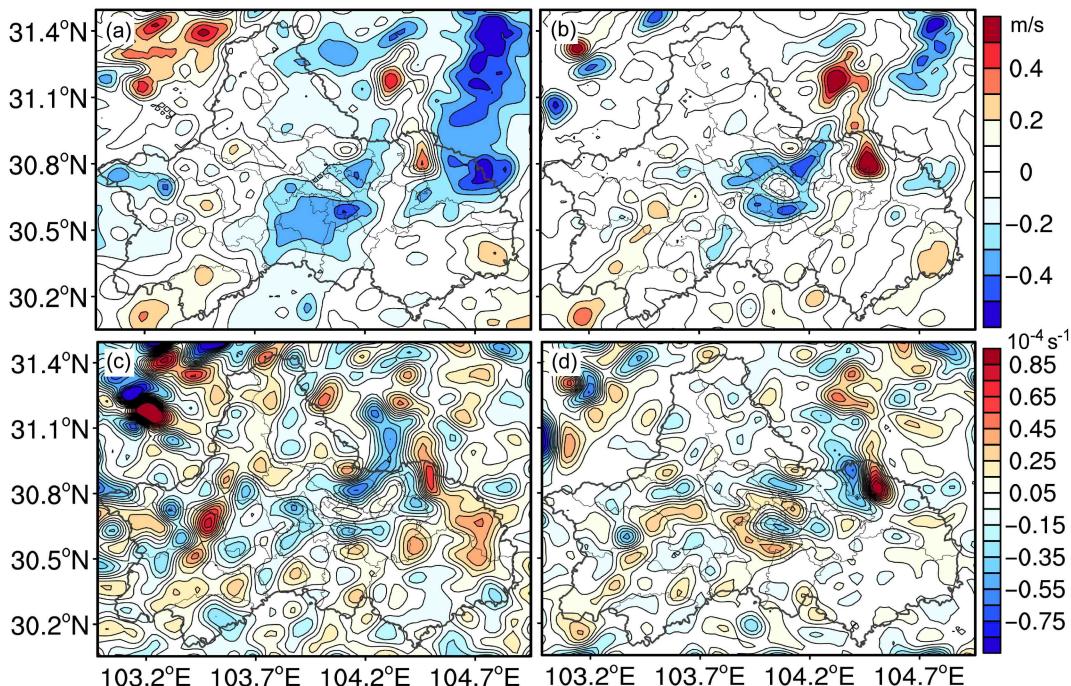


图 8 成都城市化夏季（左列）和冬季（右列）(a、b) 10-m 风速和 (c、d) 散度差异的空间分布 (NewExp—OldExp)

Fig. 8 Spatial difference distribution of (a, b) 10-m wind speed and (c, d) divergence in Chengdu's urbanized area in summer (left panel) and winter (right panel) (NewExp—OldExp)

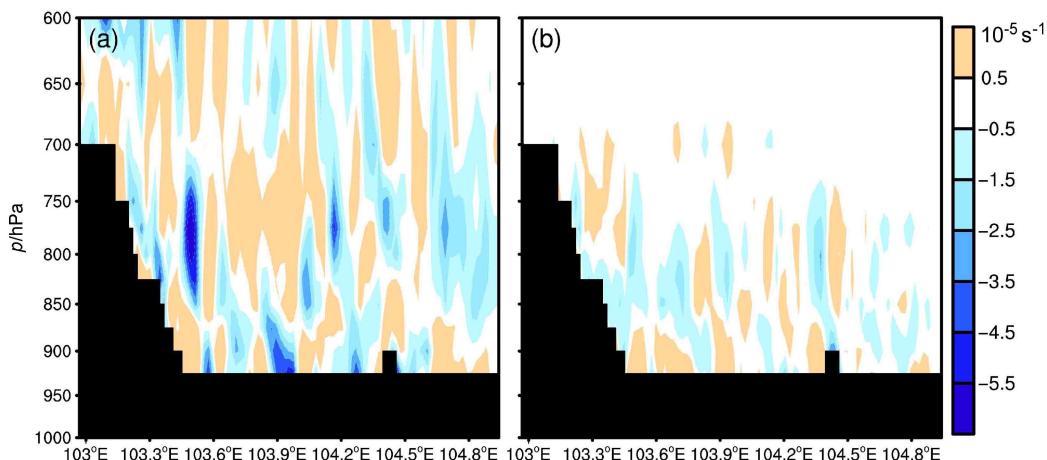


图 9 成都城市化 (a) 夏季和 (b) 冬季沿 30.67°N 散度差异 (黑色为地形) (NewExp—OldExp)

Fig. 9 Divergence differences over the urbanized area (30.67°N) of Chengdu in (a) summer and (b) winter (terrain height shown in black) (NewExp—OldExp)

更大, 使城市化作用较冬季更显著。

4.4 城市化对夏季降水的影响

城市化会使城区湍流作用增强, 人类活动还会增加大气中的颗粒物, 使云凝结核增加, 进而对降水产生影响, 并且城市化对降水量的影响与风场关系密切, 降水量增多区域通常位于城市下风方向 (孙继松和舒文军, 2007; 黎伟标等, 2009)。从图 11 可以看出, 成都地区夏季白天盛行东北风, 夜

间为偏北风, 城市化使成都地区日平均和白天时段降水量在城区的迎风区 (新都区、金牛区和青白江区部分区域) 和下风区 (温江区西北部及双流部分区域) 均增加, 但是日平均降水量在下风区的增加大值区在双流区, 且增加值和增加区域面积均比白天时段大; 在夜间时段, 城市化使下风区 (双流区、武侯区和锦江区附近区域) 降水量增大, 但对迎风区域降水影响不明显。降水增多主要是因为城市化

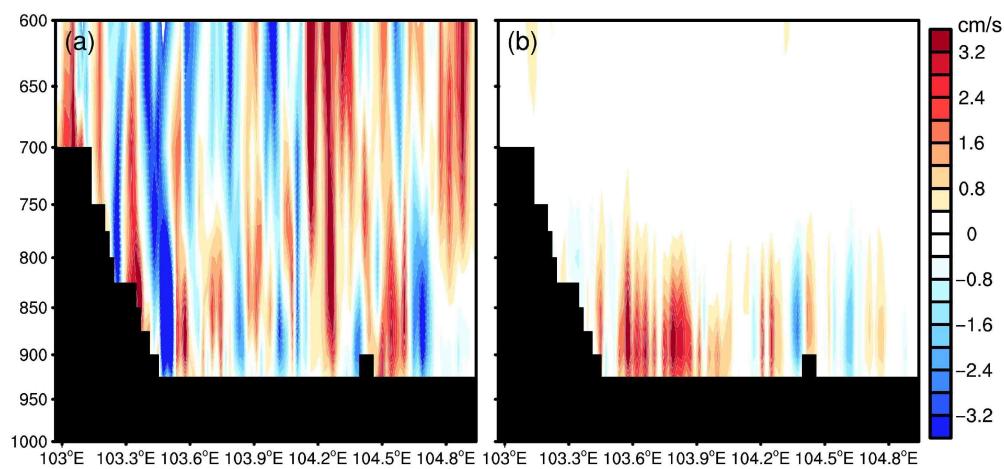


图 10 同图 9, 但为垂直速度

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for vertical speed

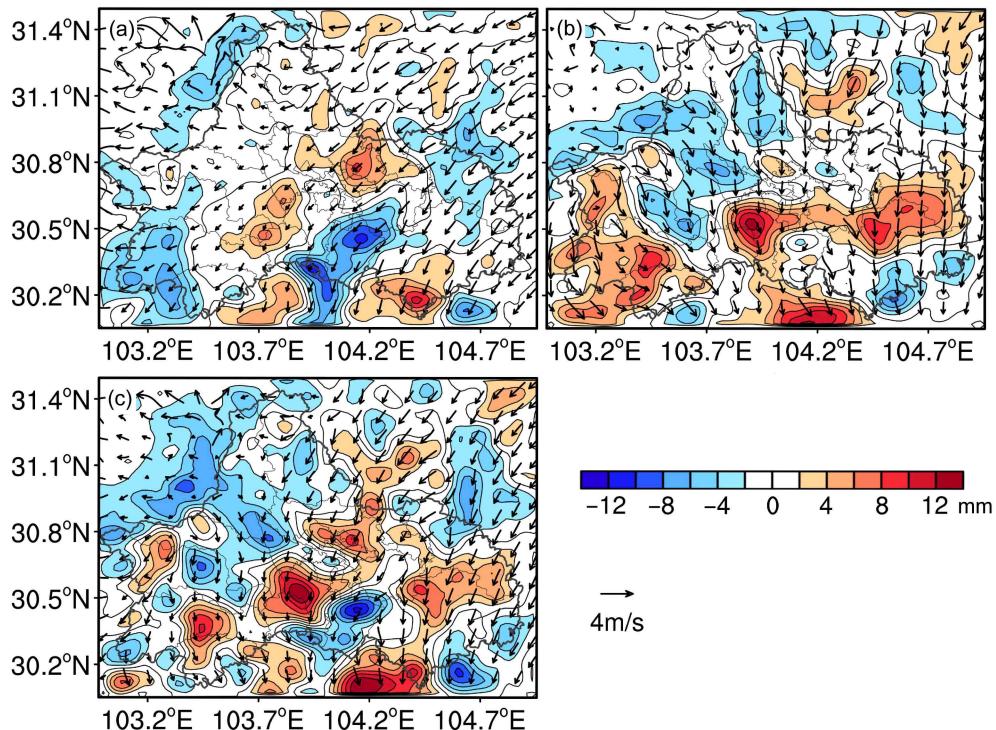


图 11 成都城市化夏季 (a) 白天、(b) 夜间、(c) 日平均降水量差异的空间分布 (NewExp—OldExp)

Fig. 11 Spatial difference distribution of summer precipitation in Chengdu's urbanization: (a) Daytime; (b) nighttime; (c) daily average (NewExp—OldExp)

后会使边界层高度增高，城市热岛增强，使湍流增强，水汽向高层输送，进而使成都城区降水量增大。

5 结论和讨论

利用耦合单层城市冠层模型的 WRF 中尺度模式，分别使用 2000 年和 2010 年两期土地利用/覆盖类型资料作为 WRF 模式的地表静态数据，设计敏感性试验，通过试验对比分析，首先验证了模式的模拟能力，然后又研究了成都市城市化对夏季和冬季气温及边界层高度、水汽及能量变化和地表风场及垂直环流的影响，得到了以下结论：

(1) 成都市城市化有明显热岛效应，夏季城区地表气温平均升高约 2.8°C ，冬季平均升高约 0.6°C ，夏季城区边界层高度平均升高约 150 m，与夏季气温升高区域一致，冬季升高约 25 m。夏季和冬季气温日较差均减小，冬季减小区域较夏季大，表明城市化对日最低气温的影响较最高气温的影响大，夏季在成都城区上空近地面区域形成气温升高区域，而冬季无明显变化。

(2) 成都市城市化使不透水下垫面面积增大，城区出现明显的“干岛”效应，2 m 相对湿度在城区及其周边地区显著减小，夏季在城区平均减小约 11%，冬季城市化对相对湿度的影响较夏季小，相对湿度平均减小约 3%。由于湍流作用，夏季在城区上空近地面区域出现水汽减小区域，在高处出现水汽增长区域，冬季垂直方向的水汽变化不明显。城区夏季潜热通量平均减小约 110 W m^{-2} ，冬季潜热通量减小范围和数值都比夏季小，减小约 22 W m^{-2} ；夏季感热通量在城区平均增大约 47 W m^{-2} ，冬季感热通量整体变化不大，仅在龙泉驿部分区域有所增加；夏季地表热通量仅在城区的部分区域有所增加，在龙泉驿区有大值区，冬季除在龙泉驿区有增大区域外，城区其他地区均减小。

(3) 成都市城市化使冬夏季城区近地面风速均减小，减小约 $0.1\sim0.6 \text{ m s}^{-1}$ ，但夏季风速较冬季风速减小区域大。冬夏两季城区散度均有所减小，夏季散度减小区域在成都的新都区、武侯区、锦江区、温江区、双流区北部和郫都区东南部及附近区域，冬季散度减小区域在城中心、新都区及城区东部的龙泉驿部分区域，冬夏季在城市扩张区域上空均有散度减小区域但冬夏季减小区域位置不同，散度减小使城区上空辐合作用增强，垂直速度增大，在夏

季和冬季城区上空均出现垂直速度增大区域，且夏季强于冬季。

(4) 成都城市化使夏季日平均和白天时段降水量在城区的迎风区和下风区均增加；在夜间时段，城市化使下风区降水量增大，但对迎风区降水量影响不明显。

本文对成都地区进行研究，分析其典型季节城市化效应，但是仅使用单一模式模拟，只能作为一项模拟研究。本次研究所采用的城市冠层方案为单层城市冠层方案，但是并未对其中的城市冠层参数进行本地化处理，今后的研究可以对冠层参数进行本地化处理（如建筑物和街道的表面反照率、建筑物高度、街道的宽度和走向等），使冠层方案能够详细表征城市实际冠层参数和形态；本次研究中城市地表类型并未细分，是当作一类的土地覆盖类型来表示，随着城市化进程加剧，同一城市不同区域城市化效应也不相同，今后研究可以使用较新的卫星下垫面土地利用类型资料，并且将城市地表细分，分为商业区、低密度住宅区、高密度住宅区等，更为细致地研究其效应；随着城市化发展会产生更多的人为热，而人为热的排放也会在热力过程上对城市气象产生影响，今后城市化研究可以利用工业、交通、建筑能耗、人体新陈代谢等资料进行估算，得出符合实际的人为热排放数据，并耦合在城市冠层方案中，使模拟结果与实际更加符合。

参考文献 (References)

- Armfield A J. 2003. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island [J]. *Int. J. Climatol.*, 23(1): 1–26. doi:10.1002/joc.859
- Chen F, Yang X C, Zhu W P. 2014. WRF simulations of urban heat island under hot-weather synoptic conditions: The case study of Hangzhou City, China [J]. *Atmospheric Research*, 138: 364–377. doi:10.1016/j.atmosres.2013.12.005
- 陈海山, 张叶. 2013. 大规模城市化影响东亚冬季风的敏感性试验 [J]. *科学通报*, 58(13): 1221–1227. Chen Haishan, Zhang Ye. 2013. Sensitivity experiments of impacts of large-scale urbanization in East China on East Asian winter monsoon [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 58(13): 1221–1227. doi:10.1007/s11434-012-5579-z
- Chen L, Zhang M G, Wang Y W. 2016. Model analysis of urbanization impacts on boundary layer meteorology under hot weather conditions: A case study of Nanjing, China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 125(3–4): 713–728. doi:10.1007/s00704-015-1535-6
- 程志刚, 杨欣悦, 孙晨, 等. 2016. 成都地区夏季城市热岛变化及其与城市发展的关系 [J]. *气候变化研究进展*, 12(4): 322–331. Cheng

- Zhigang, Yang Xinyue, Sun Chen, et al. 2016. The trend of summer urban heat island effect and its relationship with urban development in Chengdu [J]. *Climate Change Research (in Chinese)*, 12(4): 322–331. doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2015.176
- 但尚铭, 但波, 杨秀蓉, 等. 2009. 卫星遥感成都平原城市热岛效应的动态特征 [J]. *环境科学与技术*, 32(7): 10–13. Dan Shangming, Dan Bo, Yang Xiurong, et al. 2009. Dynamic characteristics of urban heat-island in Chengdu Plain by satellite remote sensing [J]. *Environmental Science and Technology (in Chinese)*, 32(7): 10–13. doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2009.07.003
- Du Y, Xie Z Q, Zeng Y, et al. 2007. Impact of urban expansion on regional temperature change in the Yangtze River Delta [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 17(4): 387–398. doi:10.1007/s11442-007-0387-0
- Emmanuel R, Krüger E. 2012. Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city: The case of Glasgow, UK [J]. *Building and Environment*, 53: 137–149. doi:10.1016/j.buildenv.2012.01.020
- Feng J M, Wang Y L, Ma Z G, et al. 2012. Simulating the regional impacts of urbanization and anthropogenic heat release on climate across China [J]. *J. Climate*, 25(20): 7187–7203. doi:10.1175/JCLI-D-11-00333.1
- Jones P D, Groisman P Y, Coughlan M, et al. 1990. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land [J]. *Nature*, 347(6289): 169–172. doi:10.1038/347169a0
- Kleerekerper L, van Esch M, Salcedo T B. 2012. How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 64: 30–38. doi:10.1016/j.resconrec.2011.06.004
- Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. 2001. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 101(3): 329–358. doi:10.1023/A:1019207923078
- Lai A Q, Liu Y M, Chen X Y, et al. 2016. Impact of land-use change on atmospheric environment using refined land surface properties in the Pearl River Delta, China [J]. *Advances in Meteorology*: 3830592. doi:10.1155/2016/3830592
- Li H X, Xiao P F, Feng X Z, et al. 2017. Using land long-term data records to map land cover changes in China over 1981–2010 [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(4): 1372–1389. doi:10.1109/JSTARS.2016.2645203
- Li L, Chan P W, Wang D L, et al. 2015. Rapid urbanization effect on local climate: Intercomparison of climate trends in Shenzhen and Hong Kong, 1968–2013 [J]. *Climate Research*, 63(2): 145–155. doi:10.3354/cr01293
- 黎伟标, 杜尧东, 王国栋, 等. 2009. 基于卫星探测资料的珠江三角洲城市群对降水影响的观测研究 [J]. *大气科学*, 33(6): 1259–1266.
- Li Weibiao, Du Yaodong, Wang Guodong, et al. 2009. Urbanization effects on precipitation over the Pearl River Delta based on satellite data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(6): 1259–1266. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.12
- 李欣, 杨修群, 汤剑平, 等. 2011. WRF/NCAR 模拟的夏季长三角城市群区域多城市热岛和地表能量平衡 [J]. *气象科学*, 31(4): 441–450. Li Xin, Yang Xiuqun, Tang Jianping, et al. 2011. Multiple urban heat islands and surface energy balance during summer in Yangtze River Delta city cluster region simulated with WRF/NCAR [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 31(4): 441–450. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2011.04.011
- Lin C Y, Chen F, Huang J C, et al. 2008. Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land–sea circulation over northern Taiwan [J]. *Atmos. Environ.*, 42(22): 5635–5649. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.03.015
- Lin W S, Zhang L, Du D S, et al. 2009. Quantification of land use/land cover changes in Pearl River Delta and its impact on regional climate in summer using numerical modeling [J]. *Regional Environmental Change*, 9(2): 75–82. doi:10.1007/s10113-008-0057-5
- Mahmood R, Pielke R A, Hubbard K G, et al. 2014. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate [J]. *International Journal of Climatology*, 34(4): 929–953. doi:10.1002/joc.3736
- Manley G. 1958. On the frequency of snowfall in metropolitan England [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 84(359): 70–72. doi:10.1002/qj.49708435910
- 梅梅, 姜允迪, 王遵娅, 等. 2017. 2016 年中国气候主要特征及主要天气气候事件 [J]. *气象*, 43(4): 468–476. Mei Mei, Jiang Yundi, Wang Zunya, et al. 2017. Climatic characteristics and major meteorological events over China in 2016 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 43(4): 468–476. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.04.009
- Oke T R. 1982. The energetic basis of the urban heat island [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 108(455): 1–24. doi:10.1002/qj.49710845502
- Oleson K W, Monaghan A, Wilhelmi O, et al. 2015. Interactions between urbanization, heat stress, and climate change [J]. *Climatic Change*, 129(3–4): 525–541. doi:10.1007/s10584-013-0936-8
- Ren G Y, Zhou Y Q, Chu Z Y, et al. 2008. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in north China [J]. *J. Climate*, 21(6): 1333–1348. doi:10.1175/2007JCLI1348.1
- Ryu Y H, Baik J J, Lee S H. 2011. A new single-layer urban canopy model for use in mesoscale atmospheric models [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(9): 1773–1794. doi:10.1175/2011JAMC2665.1
- Shepherd J M. 2005. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future [J]. *Earth Interactions*, 9(12): 1–27. doi:10.1175/EI156.1
- 史军, 梁萍, 万齐林, 等. 2011. 城市气候效应研究进展 [J]. *热带气象学报*, 27(6): 942–951. Shi Jun, Liang Ping, Wang Qilin, et al. 2011. A review of the progress of research on urban climate [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 27(6): 942–951. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.06.019
- 孙继松, 舒文军. 2007. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究 [J]. *大气科学*, 31(2): 311–320. Sun Jisong, Shu Wenjun. 2007. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31(2): 311–320. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.02.12

- Wang W C, Zeng Z M, Karl T R. 1990. Urban heat islands in China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 17(13): 2377–2380. doi:10.1029/GL017i013p02377
- 王梟轩,左小清,杨泽楠,等.2019.基于Mann-Kendall检验和信息熵的成都市1980~2016年降水时空变化[J].*中国水土保持科学*,17(4): 26–33. Wang Xiaoxuan, Zuo Xiaoqing, Yang Zenan, et al. 2019. Spatio-temporal changes of precipitation in Chengdu from 1980 to 2016 based on Mann-Kendall test and information entropy [J]. *Science of Soil and Water Conservation (in Chinese)*, 17(4): 26–33. doi:10.16843/j.sswc.2019.04.004
- 王奕丹,胡泽勇,孙根厚,等.2019.高原季风特征及其与东亚夏季风关系的研究[J].*高原气象*,38(3): 518–527. Wang Yidan, Hu Zeyong, Sun Genhou, et al. 2019. Discussion on the characteristics of Plateau Monsoon and its relationship with East Asian Summer Monsoon [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 38(3): 518–527.
- Weaver C P, Avissar R. 2001. Atmospheric disturbances caused by human modification of the landscape [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82(2): 269–282. doi:10.1175/1520-0477(2001)082<0269:ADCBHM>2.3.CO;2
- 肖丹,陈静,陈章,等.2011.成都精细下垫面信息对城市气象影响的模拟试验[J].*气象*,37(3): 298–308. Xiao Dan, Chen Jing, Chen Zhang, et al. 2011. Effect simulation of Chengdu fine underlying surface information on urban meteorology [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 37(3): 298–308. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.03.007
- 徐阳阳,刘树华,胡非,等.2009.北京城市化发展对大气边界层特性的影响[J].*大气科学*,33(4): 859–867. Xu Yangyang, Liu Shuhua, Hu Fei, et al. 2009. Influence of Beijing urbanization on the characteristics of atmospheric boundary layer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(4): 859–867.
- doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.04.18
- Yang Y K, Xiao P F, Feng X Z, et al. 2017. Accuracy assessment of seven global land cover datasets over China [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 125: 156–173. doi:10.1016/j.isprsjprs.2017.01.016
- Yu M, Carmichael G R, Zhu T, et al. 2012. Sensitivity of predicted pollutant levels to urbanization in China [J]. *Atmos. Environ.*, 60: 544–554. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.06.075
- 臧良震,苏毅清.2019.我国新型城镇化水平空间格局及其演变趋势研究[J].*生态经济*,35(4): 81–85, 110. Zang Liangzhen, Su Yiqing. 2019. Study on the spatial pattern and evolutional trend of China's new urbanization [J]. *Ecological Economy (in Chinese)*, 35(4): 81–85, 110.
- Zhang N, Gao Z Q, Wang X M, et al. 2010. Modeling the impact of urbanization on the local and regional climate in Yangtze River Delta, China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 102(3–4): 331–342. doi:10.1007/s00704-010-0263-1
- 赵小芳,王黎娟,陈红,等.2019.南海季风爆发的年代际转折与东亚副热带夏季降水的关系[J].*热带气象学报*,35(6): 831–841. Zhao Xiaofang, Wang Lijuan, Chen Hong, et al. 2019. The relationship between interdecadal change of South China Sea Monsoon onset with subtropical East Asia summer rainfall [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 35(6): 831–841.
- 郑祚芳,高华,王在文,等.2012.城市化对北京夏季极端高温影响的数值研究[J].*生态环境学报*,21(10): 1689–1694. Zheng Zuofang, Gao Hua, Wang Zaiwen, et al. 2012. Numerical simulation for the urbanization effects on a heat wave event around Beijing city [J]. *Ecology and Environmental Sciences (in Chinese)*, 21(10): 1689–1694. doi:10.3969/j.issn.1674-5906.2012.10.010