

朱丽, 苗峻峰, 赵天良. 2020. 污染天气下成都城市热岛环流结构的数值模拟. 地球物理学报, 63(1):101-122, doi:10.6038/cjg2020M0462.

Zhu L, Miao J F, Zhao T L. 2020. Numerical simulation of urban breeze circulation in a heavy pollution event in Chengdu city. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 63(1):101-122, doi:10.6038/cjg2020M0462.

污染天气下成都城市热岛环流结构的数值模拟

朱丽¹, 苗峻峰^{1*}, 赵天良²

¹ 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

² 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044

摘要 本文利用中尺度模式 WRF V3.9 对 2016 年 7 月 16 日成都一次污染天气下的城市热岛环流个例进行了数值模拟, 分析了城市热岛环流的三维结构及演变特征. 并通过设计减少气溶胶光学厚度的敏感性试验, 研究了污染对城市热岛环流的可能影响. 结果表明: 当地时间 17:00 城市热岛环流开始形成. 随着热岛强度增强, 环流增强, 城乡边界处的城市风锋不断向城市中心推进. 19:00 热岛环流结构最显著. 21:00 环流结构被破坏, 仅低层存在微弱的乡村风. 在热岛环流结构最显著时刻, 近地面风场由郊区向城市辐合, 地面以上 2.0 km 处风场由城市向乡村辐散, 辐散中心与辐合中心位置大致对应. 此时城市风锋在城市处合并, 环流的水平尺度约为城市尺度的 2~2.5 倍. 当气溶胶光学厚度减小后, 城市热岛环流尺度和强度以减小为主. 特别是在热岛环流最显著时刻, 低层乡村风风速减小, 城市风锋最大上升速度降低, 环流的水平尺度在西、南、北三个方向均减小, 且高空回流高度降低. 可能的影响机制是, 气溶胶光学厚度减小后, 净辐射通量增大, 城乡地表能量通量差异增大, 城市边界层高度升高. 但城市边界层高度升高对城市热岛的抑制作用超过了城乡地表能量通量差异增加对城市热岛的增强作用, 最终造成城市热岛减弱, 环流减弱.

关键词 盆地地形; 城市热岛环流; 大气污染; 气溶胶光学厚度

doi:10.6038/cjg2020M0462

中图分类号 P407

收稿日期 2018-06-08, 2019-09-09 收修定稿

Numerical simulation of urban breeze circulation in a heavy pollution event in Chengdu city

ZHU Li¹, MIAO JunFeng^{1*}, ZHAO TianLiang²

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

² Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract To investigate the structure and evolution of urban breeze circulation, WRF V3.9 is used to simulate a typical urban breeze circulation in a heavy pollution event on July 16, 2016 in Chengdu city. In addition, the influence of atmospheric pollution on urban breeze circulation is quantified by a sensitivity test. The results show that from 17:00 to 21:00, the circulation develops as the intensity of the heat island increases and reaches the maximum at 19:00. It is destroyed at 21:00 only with weak country wind in the lower layer. At 19:00, the wind at the surface converges to the city center and diverges from city to country at 2.0 km above ground

基金项目 国家重点研发计划重点专项项目(2016YFC0203304); 国家自然科学基金重大研究计划项目(91544109)资助.

第一作者简介 朱丽, 女, 1994 年生, 硕士研究生, 研究方向为中尺度气象学. E-mail: superzhuli1994@163.com

* 通讯作者 苗峻峰, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为中尺度数值模拟. E-mail: miaoj@nuist.edu.cn

level. The horizontal scale of the circulation is about 2~2.5 times that of the urban scale.

When the aerosol optical depth is reduced, the intensity and scale of urban heat island circulation decrease, especially at 19:00. The possible mechanism is that the reduction of the aerosol optical depth can change the radiation and energy balance at the surface. Then the net radiation flux increases, mainly resulting in the increase of the difference in the surface energy balance between urban and rural areas and the height of the urban boundary layer. However, the suppression of less stable city atmosphere on urban heat island exceeds the enhancement of increased city country energy difference on it. Finally, the intensity of the urban heat island is reduced, and the urban heat island circulation intensity is weakened.

Keywords Basin topography; Urban breeze circulation; Atmospheric pollution; Aerosol optical depth

0 引言

城市温度高于周围乡村温度的现象称之为城市热岛(黄利萍等, 2012). 城市热岛是驱动城市热岛环流的源, 当热岛达到一定强度时会激发出城市热岛环流(Hidalgo et al., 2010; 苗峻峰, 2014; 朱丽和苗峻峰, 2019). 城市热岛环流作为边界层的重要环流系统之一, 一方面影响污染物的传播和扩散, 使污染物在城市滞留(王珊等, 2015; 朱焱等, 2016; Wang et al., 2017); 另一方面在水汽充足的情况下, 有利于触发或加强城市降水(Han and Baik, 2008; 徐蓉等, 2013; Han et al., 2014). 因此, 城市热岛环流的结构特征引起了城市气象学研究者的关注.

为了探究城市热岛环流的结构特点, 各国相继开展了与热岛环流相关的大型城市气象观测试验, 但这些观测网仅能观测到环流低层的结构特征, 且时空分辨率较低. 观测表明城市热岛环流易出现在小风、高压天气下, 且伴随着强热岛现象(Munn, 1973; Shreffler, 1978; Eliasson and Holmer, 1990). 国内相关研究主要集中在北京、兰州和珠三角地区(周明煜等, 1980; 王海龙等, 1999; 王开存等, 2004; 李明华等, 2008), 成都地区较少(杨柏生, 1988). 数值模拟可以弥补观测手段分辨率低的缺陷, 是研究城市热岛环流结构特征的有效工具. Lemonsu 和 Masson(2002)利用非静力大气模式 Meso-NH 耦合城市能量模式 TEB(Town Energy Balance), 研究了夏季一次重污染天气下巴黎城市热岛环流的特征. 热岛环流在 15:00 UTC(Universal Time Coordinated)最强, 水平速度约 $5\sim 7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 垂直速度约 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 环流水平尺度约达 50 km, 移除城市地形后环流强度未变化. Hidalgo 等(2008a)利用相同的模式研究了

夏季法国内陆城市图卢兹热岛环流的结构和演变特征, 发现城市热岛环流出现在 12:00—18:00 UTC, 期间热岛强度为 $1\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最强时环流水平尺度约为城市尺度的 2 倍, 厚度达 1500 m, 最大垂直速度约 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 入流速度约 $5\sim 7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 我国与城市热岛环流相关的数值模拟研究主要集中在东部沿海地区(徐敏等, 2002; 蒋维楣和陈燕, 2007; 何晓凤等, 2007; 刘树华等, 2008, 2009; 东高红等, 2015), 专门针对城市热岛环流结构和演变特征的定量分析相对较少, 仅鞠丽霞等(2003)挑选典型的热岛环流个例, 模拟发现济南城市热岛环流在 16:00 (当地时, 下同)时最强, 此时环流的高度达 400 m 左右, 城乡温差达 $4\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

成都城市热岛效应显著, 目前相关的研究主要关注成都温度场的特征, 且分析的资料多为遥感资料. 张伟等(2007)分析了成都多年春季遥感资料, 发现城市化使成都城市热岛总面积扩大, 热岛强度可达 $5\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 热岛强度最大值不在城市中心. 李晓敏和曾胜兰(2015)、程志刚等(2016)分别分析了 MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) 地表温度数据, 指出成都热岛在空间上呈环状分布, 白天强于夜间. 最近, 李肇洁和曾胜兰(2016)利用 WRF (Weather Research and Forecasting Model) 模式模拟成都一次城市热岛个例, 研究了成都城市热岛的产生机制, 发现城市化改变了成都城市的能量平衡, 造成城市热岛, 该次个例中热岛强度约 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

关于成都城市热岛的研究已取得了较为丰富的成果, 但是关于成都城市热岛环流的研究较少. 统计分析表明成都地区风场常年较弱(周书华等, 2014; 董靓和黄瑞, 2014). 此外, 四川盆地已经成为中国几大污染区之一, 且污染物易于在盆地底部堆积(王银牌等, 2018; Ning et al., 2018), 研究表明小风、污染会加重城市热岛效应(王珊等, 2015). 因此, 本

文利用高分辨率的数值模式 WRF V3.9, 挑选重污染、小风天气下成都城市热岛环流个例进行模拟, 以揭示成都城市热岛环流的结构和演变特征, 这有利于更清楚地认识成都城市边界层的结构特征. 污染会影响边界层内环流的强度 (Yang et al., 2016), 前人在模拟污染天气下城市边界层结构时, 未在模式中考虑污染物对气象场的影响 (黄义和范绍佳, 2009). 本文通过指定气溶胶光学厚度这一半理想的方法, 考虑污染对气象场的影响, 使得模拟与观测更加接近, 这是本文的一个创新点. 此外, 本文设计气溶胶光学厚度的敏感性试验, 试图探索污染对城市热岛环流的可能影响. 这一研究工作有助于揭示局地环流与大气污染的相互作用, 为合理的城市规划提供依据.

1 资料与研究个例

本文采用的资料主要包括: 成都空气质量指数资料, 地面常规气象站观测资料, 温江站探空资料, NCEP(National Centers for Environmental Prediction) $1^\circ \times 1^\circ$ 的 6 h 一次的全球再分析资料.

2016 年 7 月 16 日成都晴朗、少云, 08:00 500 hPa 天气形势图显示 (图 1), 成都地区整体处在槽后脊前, 盛行偏北风, 且等压线稀疏, 背景风场弱, 天气形势稳定. 温江站探空显示 (图 7b, c), 500 hPa 以下风

速低于 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 也说明该天大尺度的背景风较弱, 无低空急流影响, 这些气象条件有利于局地环流的出现. 成都及周边 15 个地面常规气象站的逐时降水和总云量数据显示当天无降水, 平均总云量约 3 成左右, 且该天处于夏季, 这有利于形成城市热岛 (肖丹等, 2011). 从地面 2 m 温度场的水平分布看, 城市处在高温区 (图略). 从地面 10 m 风向风速分布看 (图 5, 6), 17:00 离城市较近的温江站、双流站、新都站等测站风向由吹离城市转变为吹向城市, 即出现乡村风. 此外, 成都当天总体为重度污染天气, AQI (Air Quality Index) 值高达 209, 周边的眉山、德阳、资阳为轻度污染. 从图 2 可以看出, 当天成都城区周围污染较为严重, AQI 均高于 200. 但离城市较远的都江堰市、彭州污染较轻. 可见受热岛环流影响, 污染物在城市中较为集中. 因此, 此个例是一个典型的污染天气条件下的城市热岛环流个例, 值得深入研究.

2 模式结构和数值模拟方案

已有研究表明, WRF 模式对中尺度局地环流有较好的模拟能力 (刘振鑫等, 2012; 杨秋彦等, 2017), 本文采用中尺度模式 WRF V3.9 对所选个例进行数值模拟. 模拟的起始时间为 2016 年 7 月 15 日 08:00, 积分 42 h, 前 16 h 为模式“起转” (spinup) 时

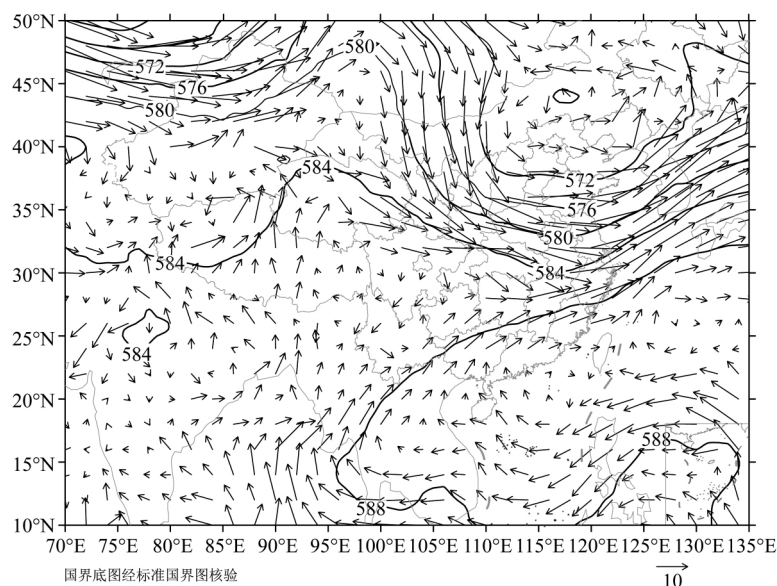


图 1 NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料 2016 年 7 月 16 日 08:00 风场 (矢量, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 位势高度场 (等值线, 单位: dagpm)

Fig. 1 NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data for wind field (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and geopotential height field (contour line, unit: dagpm) at 08:00 on 16 July, 2016

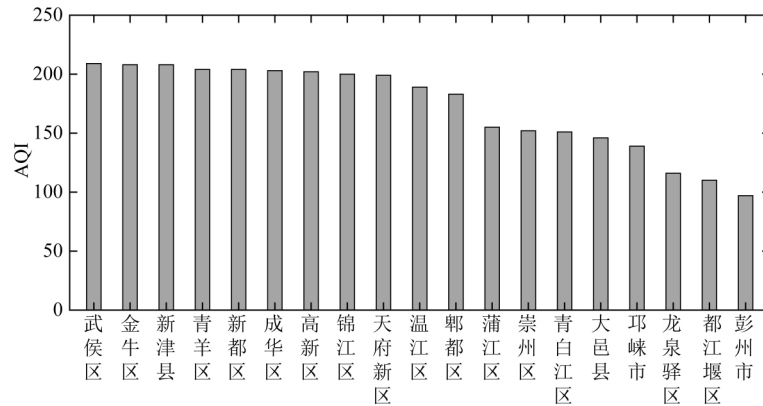


图2 2016年7月16日成都各观测站空气质量状况(AQI:101~150为轻度污染,151~200为中度污染,201~300为重度污染,301~500为严重污染)

Fig. 2 Air quality index (AQI) of different sites in Chengdu on 16 July, 2016 (AQI: 101~150 light pollution, 151~200 moderate pollution, 201~300 heavy pollution, 301~500 severe pollution)

间,之后 24 h 的模拟结果用于分析. 模式的初始场和边界条件由 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的 NCEP 再分析资料提供,其中边界条件每 6 h 更新一次. 模式采用四重双向嵌套方案(图 3a),水平分辨率由外至内分别为 27 km, 9 km, 3 km 和 1 km,垂直方向设置 35 层不等间距的 σ 层,模式层顶气压为 100 hPa,其中 2 km(AGL, Above Ground Level,下同)以下设置 24 层,目的是模拟边界层的垂直结构. 模式物理过程参数化方案的选取具体如表 1 所示(苏涛等, 2017; 杨秋彦等, 2017). 对城市热岛较为准确的模拟是研究热岛环流的关键,因此我们将陆面方案 Noah 与单层城市冠层模式(Urban Canopy Model, UCM)耦合(徐蓉等, 2013). UCM 考虑了城市几何特征对城市地表能量平衡和风切变的影响,包括建筑物阴影、街区方向、方位角日变化、对短波和长波辐射反射、冠层风廓线、人类活动引起的人为热以及屋顶、墙壁和路面的多层热传递,能较好地模拟城市热力学和动力学的特征(Kusaka and Kimura, 2004). 本文将人为热设置为 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. 此外,为了考虑污染对气象要素的影响,本文选用 RRTMG (Rapid Radiative Transfer Model for GCMs)短波辐射方案和 RRTMG 长波辐射方案. 污染物在大气中聚集形成气溶胶(李晓静等, 2003),气溶胶影响辐射,最终影响气象场特征. RRTMG 辐射方案重点考虑了气溶胶对大气的影

响,因此采用 RRTMG 辐射方案,可以考虑污染对大气的影,使得模拟与实际更加吻合(苏涛等, 2017; 王昕然等, 2018). 550 nm 波段气溶胶光学厚度可以较好地表示大气的污染程度(李晓静等, 2003; 王银牌等, 2018),7 月 16 日成都为重度污染天气,因此我们将 550 nm 波段气溶胶光学厚度值

表 1 模式主要物理参数化方案的设置

Table 1 Settings of the main physical parameterizations

物理过程	参数化方案
短波辐射	RRTMG(Iacono et al., 2008)
长波辐射	RRTMG(Iacono et al., 2008)
微物理学	Lin(Lin et al., 1983)
积云参数化(仅 D1)	Kain-Fritsch(Kain, 2004)
边界层	MYJ(Janjić, 1994)
城市冠层	UCM(Chen et al., 2011)
陆面过程	Noah(Chen and Dudhia, 2001)

3 模拟与观测的比较

为了验证模拟结果的可靠性,本文利用逐时的地面观测资料和温江站的探空资料与模拟结果的 2 m 温度场,10 m 风场,及温江站的温度廓线,风速、风向廓线进行对比. 本文共选取了六个代表站(分布见图 3c),将模拟的 2 m 温度与观测进行比较,且这

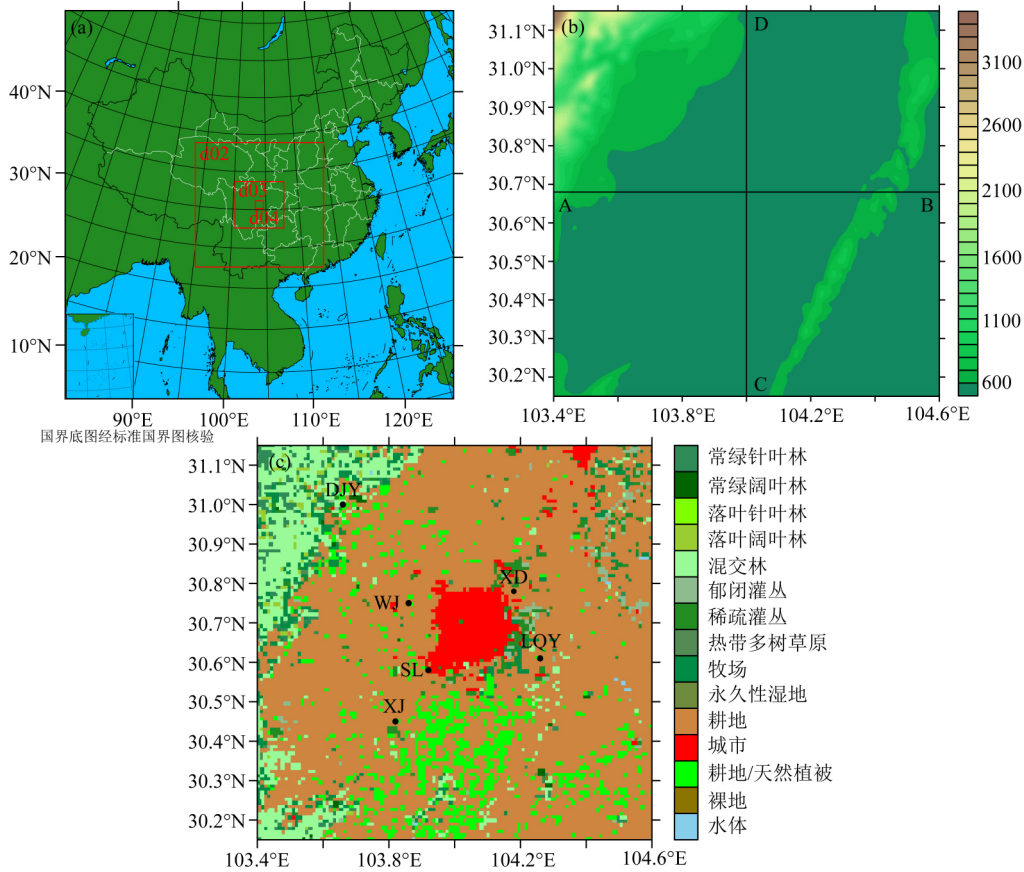


图3 模拟区域示意图

a) 模拟的四重嵌套区域; (b) D4 区域的地形分布(单位:m); (c) D4 区域的土地利用类型分布(图上缩写表示气象观测站站名, DJY:都江堰, WJ:温江, XD:新都, SL:双流, LQY:龙泉驿, XJ:新津).

Fig. 3 Simulation domain settings

(a) Coverage of model domains 1, 2, 3 and 4 (denoted by D1, D2, D3 and D4 respectively); (b) Terrain height in D4 (shaded, unit: m); (c) Land use categories in D4 (abbreviations denote the names of the meteorological stations, DJY: Dujiangyan, WJ: Wenjiang, XD: Xindu, SL: Shuangliu, LQY: Longquanyi, XJ: Xinjin).

六个代表站兼顾城市站和乡村站. 结果显示(图4), 模式可以较好地模拟出2 m温度的日循环特征, 其中模拟出的龙泉驿站的温度偏低, 造成这一差异的可能原因之一是龙泉驿站的模式地形高度低于实际地形高度.

城市热岛环流发生时, 城市处的风向会表现出向城市辐合的特征, 因此对风向模拟的好坏是衡量模拟结果好坏的重要标准之一. 图5、6是六个代表站的逐时风速、风向的观测和模拟结果对比图. 可见模式对风速、风向的模拟基本合理, 误差在可接受范围内. 城市周围的四个测站观测显示地面乡村风出现时间大约为17:00—21:00, 由于各站点到城市距离不同, 所以不同站的开始和结束时间不同. 模式可以较好地模拟出风向的转变特征, 其中, 城市西侧站点温江站(图5a、6a)在17:00—18:00之间开始吹乡村风, 22:00—23:00风速骤减为零, 说明此时

乡村风逐渐消失. 模拟结果显示风向在18:00—19:00开始转变, 与观测相比滞后约1 h, 风速与观测相比略微偏大. 城市西南侧双流站(图5b、6b)风速在16:00—17:00增大, 风向开始由郊区吹向城市, 20:00双流站几乎静风, 说明此时乡村风消失. 模拟显示风向在17:00—18:00出现由偏西风向偏东风的转变, 20:00之后双流站风速减小, 说明双流站风向模拟效果较好, 但风速模拟偏大. 城市东北侧新都站(图5c、6c)16:00—17:00开始出现乡村风, 20:00—21:00风向发生180°转变, 风速减小, 模拟出的乡村风的出现时间和结束时间与观测均较吻合. 龙泉驿站位于城市东南侧(图5d、6d), 乡村风出现时间约为16:00—20:00, 模拟与观测结论吻合, 但观测显示18:00—19:00龙泉驿站受谷风影响, 模拟未能体现谷风的影响.

此外, 为了检验模式对各层温度和风场的模拟

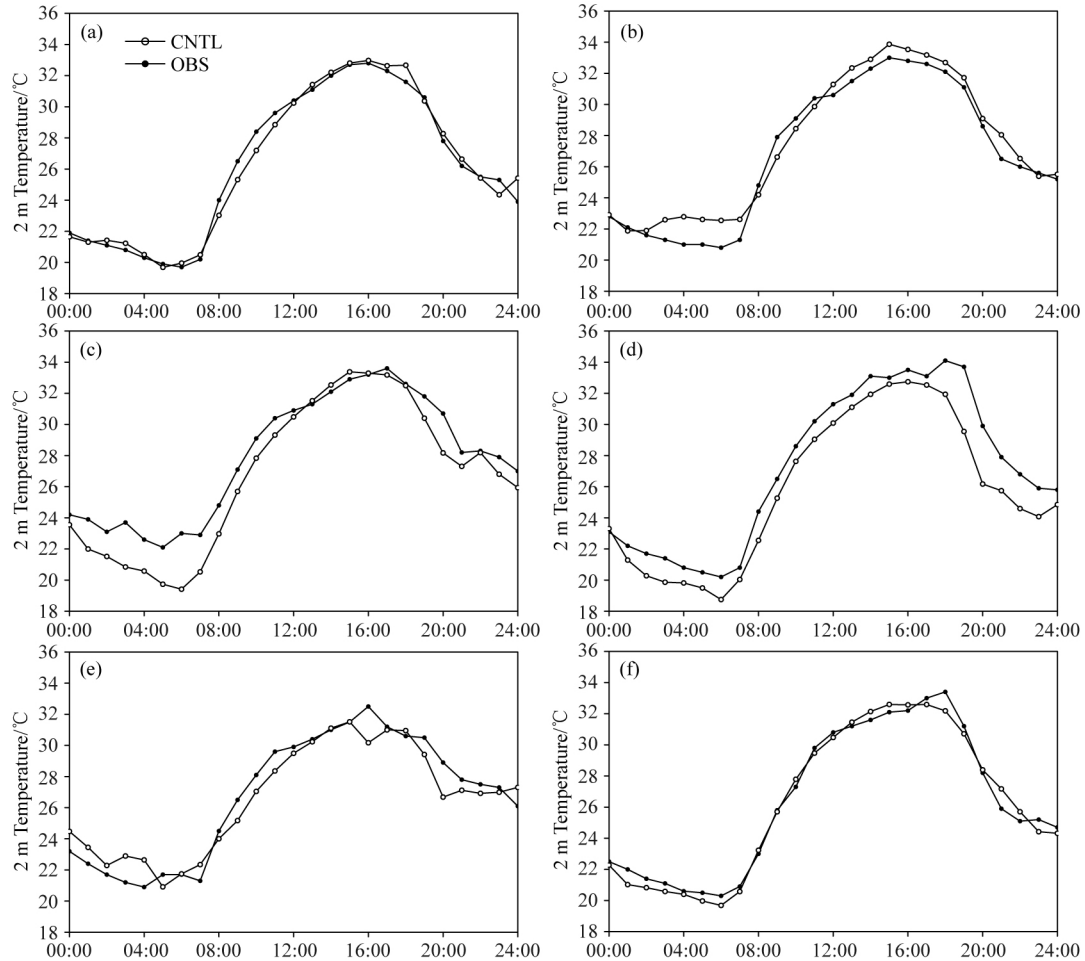


图4 2016年7月16日成都6个气象站观测与模拟的站点2 m温度(单位: °C)

(a) 温江站; (b) 双流站; (c) 新都站; (d) 龙泉驿站; (e) 都江堰站; (f) 新津站.

Fig. 4 Observed and simulated 2 m temperature (unit: °C) of 6 weather stations in Chengdu on 16 July, 2016

(a) Wenjiang; (b) Shuangliu; (c) Xindu; (d) Longquanyi; (e) Dujiangyan; (f) Xinjin.

效果,选取温江探空站的温度和风廓线与模拟结果进行对比.从温江站温度廓线图上(图7a),测站上空1.5 km以下,模式模拟的温度与观测几乎一致,1.5 km以上模式可以模拟出温度的整体变化趋势.从温江站风廓线图上(图7b和7c),模拟的风速与风向的变化趋势和转折点与探空观测基本吻合,误差在可接受范围内.图7c可以看出,20:00在测站上空0.5~1.0 km之间风向切变很大,这可能是由于此时城市受热岛环流影响(Hidalgo et al., 2008b),且该环流可以影响到温江站,故此时温江站风向廓线上出现偏南风转偏北风,至2.5 km以上,下垫面对风场的影响逐渐减弱,温江站主要受背景西风影响.

总体来看,模拟结果与观测较为吻合,可以反映出城市热岛环流的基本特征,存在的误差主要由实际地形与模式地形差异引起,在可接受范围之内.

4 控制试验结果分析

4.1 城市热岛

城市热岛是驱动城市热岛环流的能源,因此本文首先分析城市热岛强度的演变特征,这有利于揭示热岛环流演变的原因.本文将模拟的D4区域中城市点与非城市点处的平均2 m温度的差值定义为城市热岛强度(曾胜兰, 2015).成都城市的平均2 m温度始终高于非城市地区(图8a),城市热岛效应明显(图8b),且热岛强度具有日变化,最小值出现在08:00,约为1.0 °C,之后逐渐增强,最大值出现在20:00,此时热岛强度可达4.6 °C,之后城市热岛强度减弱.其中,在18:00—20:00期间,城市热岛强度增加最快.

由城市下垫面独特的热力性质造成的城乡地表能量平衡差异是城市热岛形成的主要原因(Hidalgo

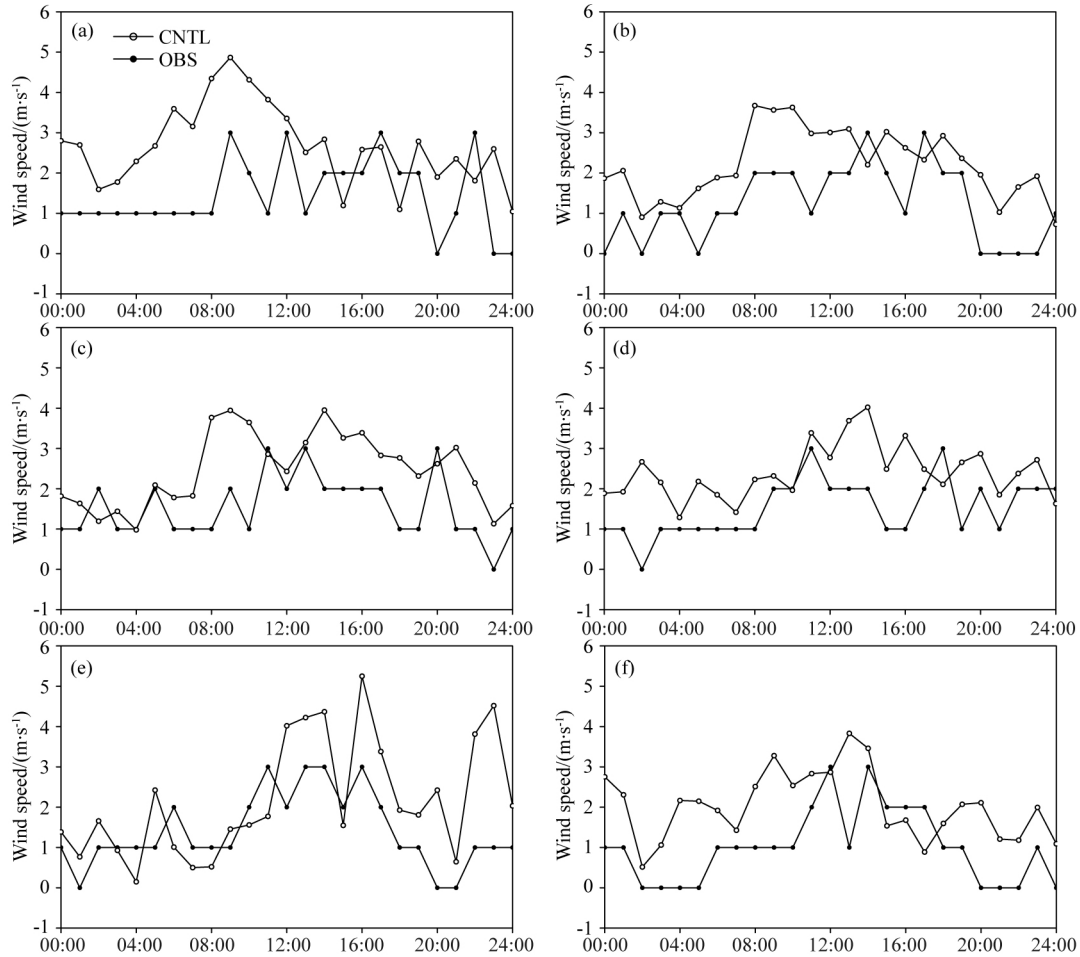


图 5 2016 年 7 月 16 日成都 6 个气象站观测与模拟的 10 m 风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) 温江站; (b) 双流站; (c) 新都站; (d) 龙泉驿站; (e) 都江堰站; (f) 新津站。

Fig. 5 Observed and simulated 10 m wind speed (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of 6 weather stations in Chengdu on 16 July, 2016

(a) Wenjiang; (b) Shuangliu; (c) Xindu; (d) Longquanyi; (e) Dujiangyan; (f) Xinjin.

et al., 2008a; Li et al., 2014). 图 9、图 10 显示了城市和非城市地区的净辐射通量和地表能量平衡中各通量的日循环特征. 城乡净辐射通量差异总体较小(图 9b), 这一特征与 Hidalgo 等(2008b)观测到的特征一致. 由于城市对短波的截陷效应, 城市地区吸收更多的短波辐射. 但是城市地表温度高于非城市地区, 因此城市释放出的长波辐射较非城市地区增多, 尤其在午后, 城市地表温度高于周围非城市地区, 造成了城市净辐射略低于非城市地区. 夜间太阳短波辐射为零, 城市和非城市地区的净辐射差异主要是长波辐射差异. 城市地面温度较高, 释放的长波辐射较非城市地区多, 因此夜间城市处的净辐射负值较大. 这与圣路易斯地区晴朗的夏天城市较郊区表现出的反射短波辐射少, 释放长波辐射多的特征相一致(White et al., 1978). 地表获得的净辐射主要以感热、潜热和土壤热的形式影响大气, 由于下垫面热力性质不同, 城乡地表能量平衡特征具有差异.

图 10(a, c, e)显示, 城市地区辐射通量主要转化为感热和土壤热通量, 潜热通量较小. 因此, 更多的能量被用于加热近地面大气. 相比之下, 非城市地区植被较多, 土壤含水量较高, 能量主要以潜热形式存在. 根据图 10b 可知, 白天城市热岛主要是城乡感热差异造成的, 城市和非城市的感热通量差异在 16:00 达到最大, 约 $180 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 人为热的存在使得夜间城乡感热差异保持较小的正值. 根据图 10f 可知, 因为城市下垫面有较强的热传导能力、储热能力(Ek et al., 2003), 所以白天城市下垫面存储了大量的土壤热通量($-94.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). 18:00 以后, 存储在下垫面中的土壤热通量开始释放($74.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 夜间城市平均释放的土壤热通量可达非城市($26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)的 3 倍. 这些有利于夜间城市热岛的维持或增强, 此外, 18:00 以后湍流混合减弱也有利于热岛的增强(Li et al., 2014), 故 18:00—20:00 城市热岛增强速度最快, 并于 20:00 最强. 之后,

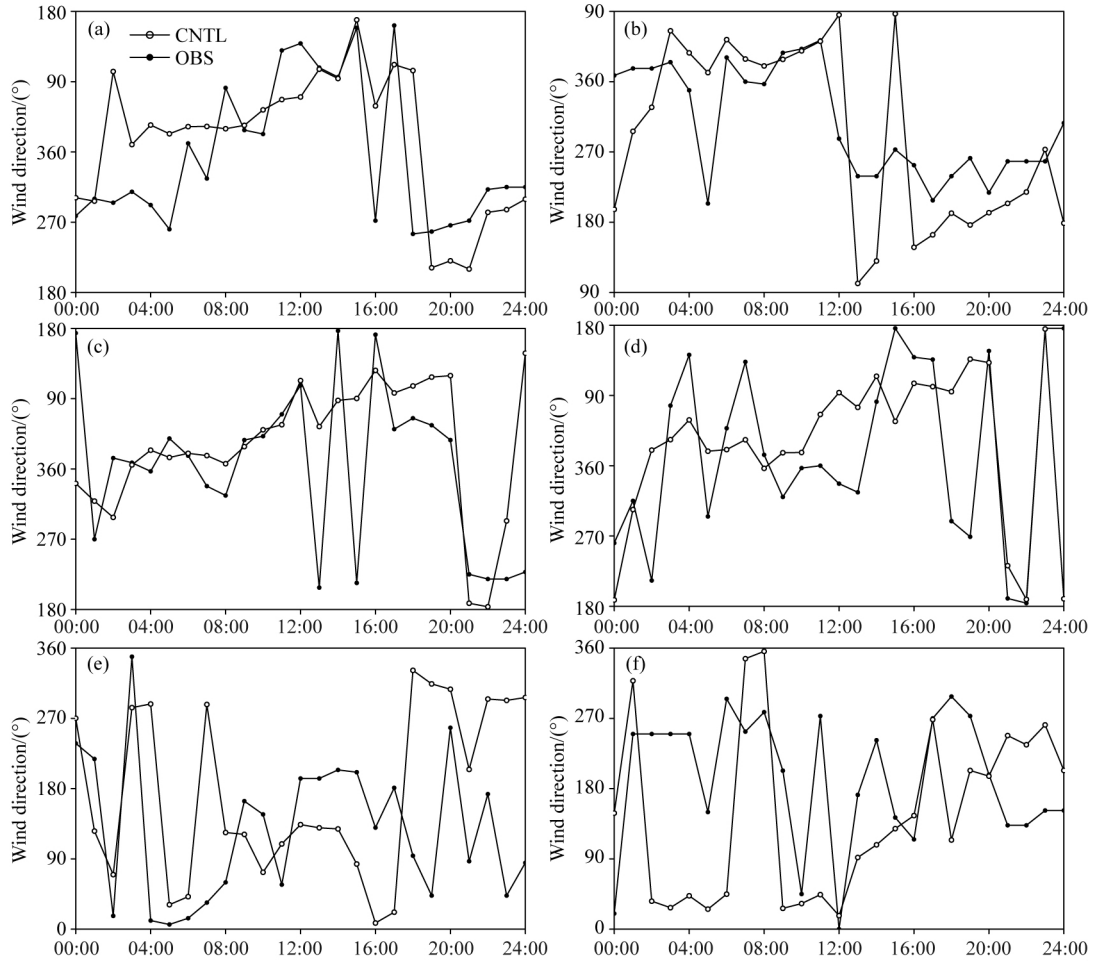


图 6 2016 年 7 月 16 日成都 6 个气象站观测与模拟的 10 m 风向

(a) 温江站; (b) 双流站; (c) 新都站; (d) 龙泉驿站; (e) 都江堰站; (f) 新津站.

Fig. 6 Observed and simulated 10 m wind direction (unit: °) of 6 weather stations in Chengdu on 16 July, 2016

(a) Wenjiang; (b) Shuangliu; (c) Xindu; (d) Longquanyi; (e) Dujiangyan; (f) Xinjin.

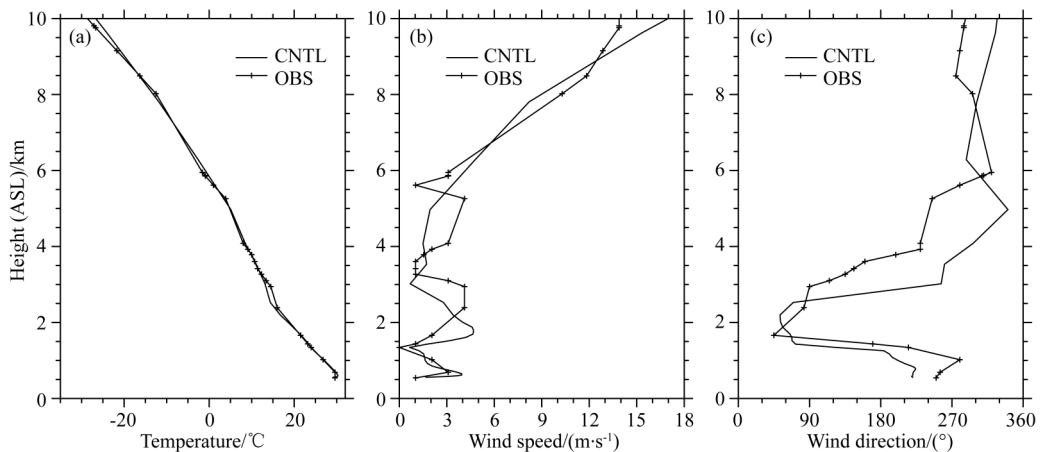


图 7 2016 年 7 月 16 日 20:00 温江站观测与模拟的(a)温度;(b)风速;(c)风向廓线

Fig. 7 Observed and simulated (a) temperature, (b) wind speed,

(c) wind direction profile of Wenjiang at 20:00 on 16 July, 2016

城乡土壤热通量差异减小,热岛强度逐渐减弱.

4.2 城市热岛环流水平结构

当近地层风场上出现由郊区吹向城市的乡村风

时,标志着城市热岛环流的产生.08:00 成都城市热岛强度最弱,此时城市处的 10 m 风场表现为由城市向东西两侧辐散(图略),强度较弱,即出现反热岛

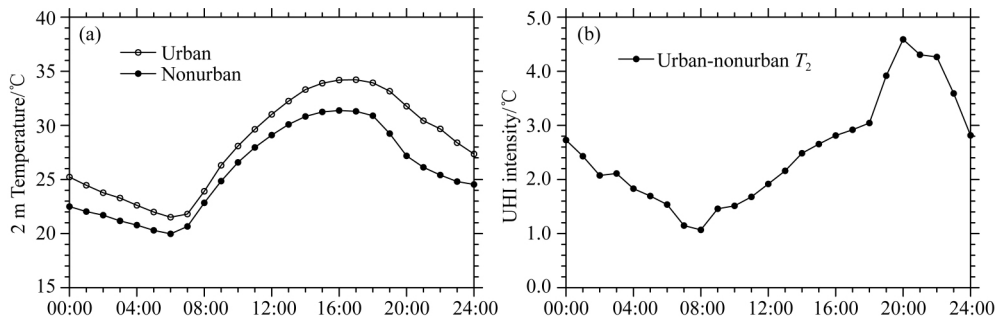


图 8 2016 年 7 月 16 日 D4 区域 (a) 城市和非城市地区平均 2 m 温度;
(b) 城市热岛强度 ($T_{2 \text{ urban}} - T_{2 \text{ nonurban}}$) 随时间的变化

Fig. 8 Diurnal variation of (a) 2 m temperature averaged over urban and nonurban areas respectively,
(b) urban heat island intensity ($T_{2 \text{ urban}} - T_{2 \text{ nonurban}}$) in D4 on 16 July, 2016

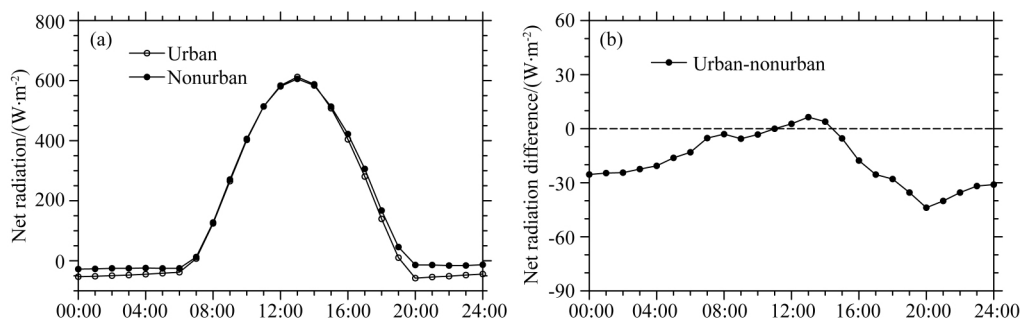


图 9 2016 年 7 月 16 日 D4 区域 (a) 城市和非城市地区平均净辐射通量;
(b) 净辐射通量差异随时间的变化图

Fig. 9 Diurnal variation of (a) net radiation flux averaged over urban and nonurban areas respectively,
(b) net radiation flux difference between urban and nonurban areas in D4 on 16 July, 2016

环流(Savijärvi and Liya, 2001; Seo et al., 2017). 之后,成都市主要受偏东气流控制.日落前后城市热岛强度强且增强速度快,大气中尺度斜压性加强,有助于城市热岛环流的产生(Bach, 1970; 李国平, 1990),因此此时成都城市附近风场主要受城市热岛环流影响.17:00(图 11a)城市边缘处等位温线分布密集,成都市区西侧开始形成由郊区吹向城市的乡村风,城市东侧的风速略微增加.最终东、西侧的乡村风约在 103.88°E 汇合.南北侧的乡村风约在 30.68°N 汇合.18:00(图 11b), 32°C 等温线向北、向东收缩,城市热岛水平范围缩小,城市南侧和西侧的温度梯度加大.西侧与东侧的地面乡村风大约在 103.98°E 汇合.这一阶段城市西侧乡村风 1 h 大约向城市推进了 10 km.城市南、北两侧的乡村风风速增加,辐合强度增强,辐合线约在 30.68°N .此时城市北部 30.8°N — 30.9°N 处,受较弱的偏南气流控制,充分说明了城市北侧 30.7°N — 30.8°N 间向城市辐合的偏北风是由于城市热岛激发出来的.从而证明此时城市的风场主要受城市热岛环流的影响.19:00(图 11c)乡村风的辐合中心大约在 $(104^{\circ}\text{E}, 30.68^{\circ}\text{N})$,风

速约 $4\sim 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.虽然乡村风辐合的位置较上一时刻变化不大,但该时刻城市处的风向转变较大,城市南侧风速增加约 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,造成风场辐合强度较上一时刻明显增强.20:00(图 11d)城市热岛范围缩小,乡村风风速减小约 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,乡村风辐合最强中心约在 $(104^{\circ}\text{E}, 30.71^{\circ}\text{N})$.此时龙泉山脉处风场出现向山脉两侧地形较低处辐散的特征,说明山风开始出现,山风大致可影响到金堂、龙泉驿和简阳一带.21:00(图略),城市主要受南风控制,乡村风风速减弱,范围缩小,仅在 30.82°N 存在较弱的乡村风辐合线.

图 11 重点分析了城市热岛环流在形成、发展及减弱阶段城市低层风场的水平结构特征.为了更加清晰地表示乡村风的演变特征,本文分析了 104°E 经线和 30.68°N 纬线上 10 m 风场随时间的变化.东西方向上,17:00 热岛强度较强,且大气稳定度较低,地面出现向城市辐合的乡村风,城市热岛环流开始出现.19:00 城市风场辐合最强,城市热岛水平环流最强.之后,偏西风的增强,使得东侧地面乡村风削弱,辐合减弱,辐合位置东移至 21:00,城市主要

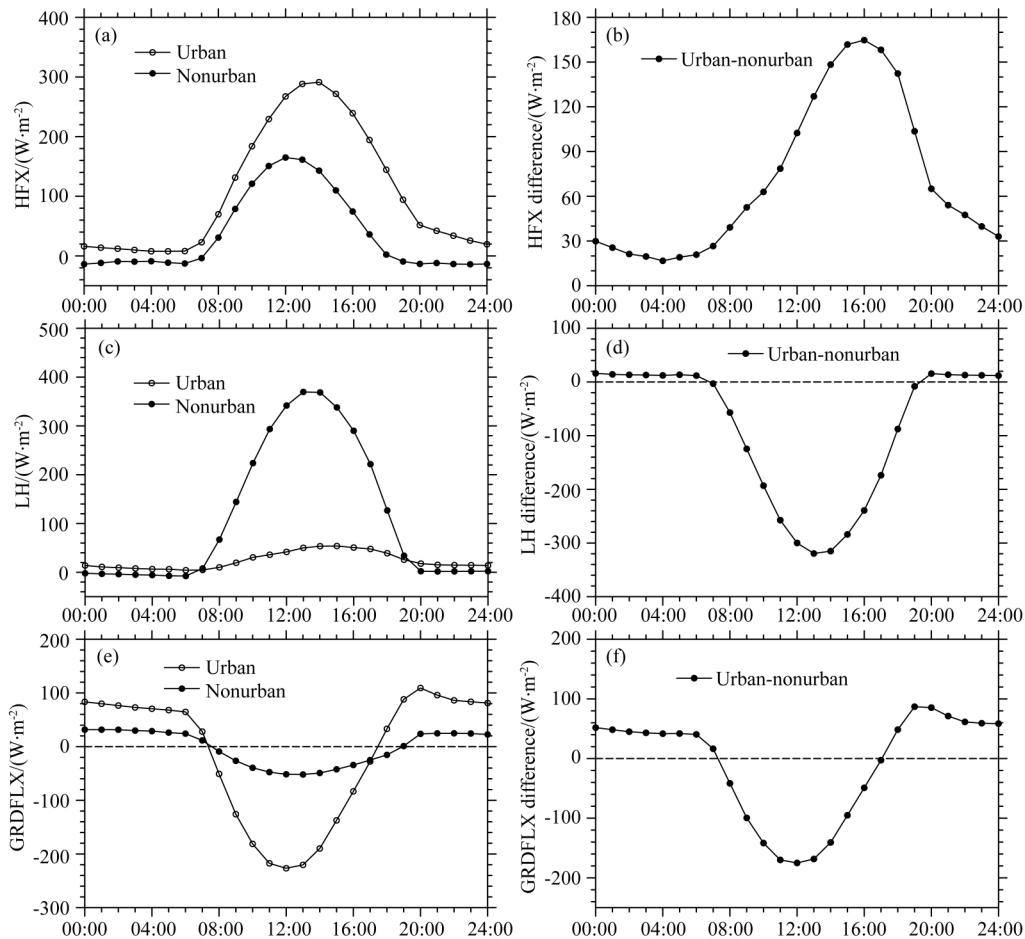


图 10 2016 年 7 月 16 日 D4 区域地表能量平衡过程中城市和非城市地区各分量和各分量差异随时间的变化
(a) 感热通量; (b) 感热通量差异; (c) 潜热通量; (d) 潜热通量差异; (e) 土壤热通量; (f) 土壤热通量差异.

Fig. 10 Diurnal variation of each component of the surface energy balance averaged over the urban and nonurban areas respectively and its difference between urban and nonurban areas in D4 on 16 July, 2016

(a) Sensible heat flux; (b) Sensible heat flux difference; (c) Latent heat flux; (d) Latent heat flux difference;
(e) Ground heat flux; (f) Ground heat flux difference.

受偏西风影响. 之后, 一方面, 偏西风使城市东侧温度梯度增大, 有利于城市东侧的乡村风加强, 另一方面, 此时在龙泉山脉范围内开始出现山风, 山脉西侧的山风对乡村风有一定影响, 故最终在 22:00—24:00, 城市东侧再次出现了微弱的乡村风. 南北方向上, 乡村风出现的时间较东西方向上早, 可能是成都城市形状并非均匀对称分布, 造成热岛形状非均匀对称分布的, 故城市不同方位上乡村风出现时间不同(Han and Baik, 2008). 19:00 前后, 城市中心以南和以北分别对应着南风 and 北风的大值区, 这说明此时南北两侧的乡村风辐合强度最强. 偏南风使得城市北侧等温线密集, 故北侧指向城市的温度梯度加大, 偏北风增强, 造成 22:00—23:00 城市北侧再次出现微弱的乡村风. 这一特征也说明了城市热岛环流这一中小尺度环流的局地性很强, 受热岛影响很大.

4.3 城市热岛环流垂直结构

乡村风在(104°E, 30.68°N)处辐合最强, 因此过该点作风场的纬向和经向剖面, 以便最大程度地显示城市热岛环流的垂直结构. 与水平速度相比垂直速度量级较小, 因此在合成垂直风矢量时, 将垂直风速扩大 5 倍, 图 12 中红色线条表示成都城市位置.

午后, 太阳辐射增强, 下垫面接收到的热量增多, 城市热岛不断增强; 且大气斜压性强, 湍流活动强烈. 在城市边界层气象场东西向垂直剖面图上, 风场主要表现为自西向东传播的波动气流(肖丹等, 2011). 17:00(图 13a)城市热岛环流正处在发展阶段. 从城市处风场的垂直剖面图上可知, 城市西侧开始出现弱的西风分量, 城市东侧风场由于受背景气流和热岛环流的共同作用, 风速增加. 东侧东风与西侧西风在 103.9°E 汇合, 东侧环流结构较清晰, 低层

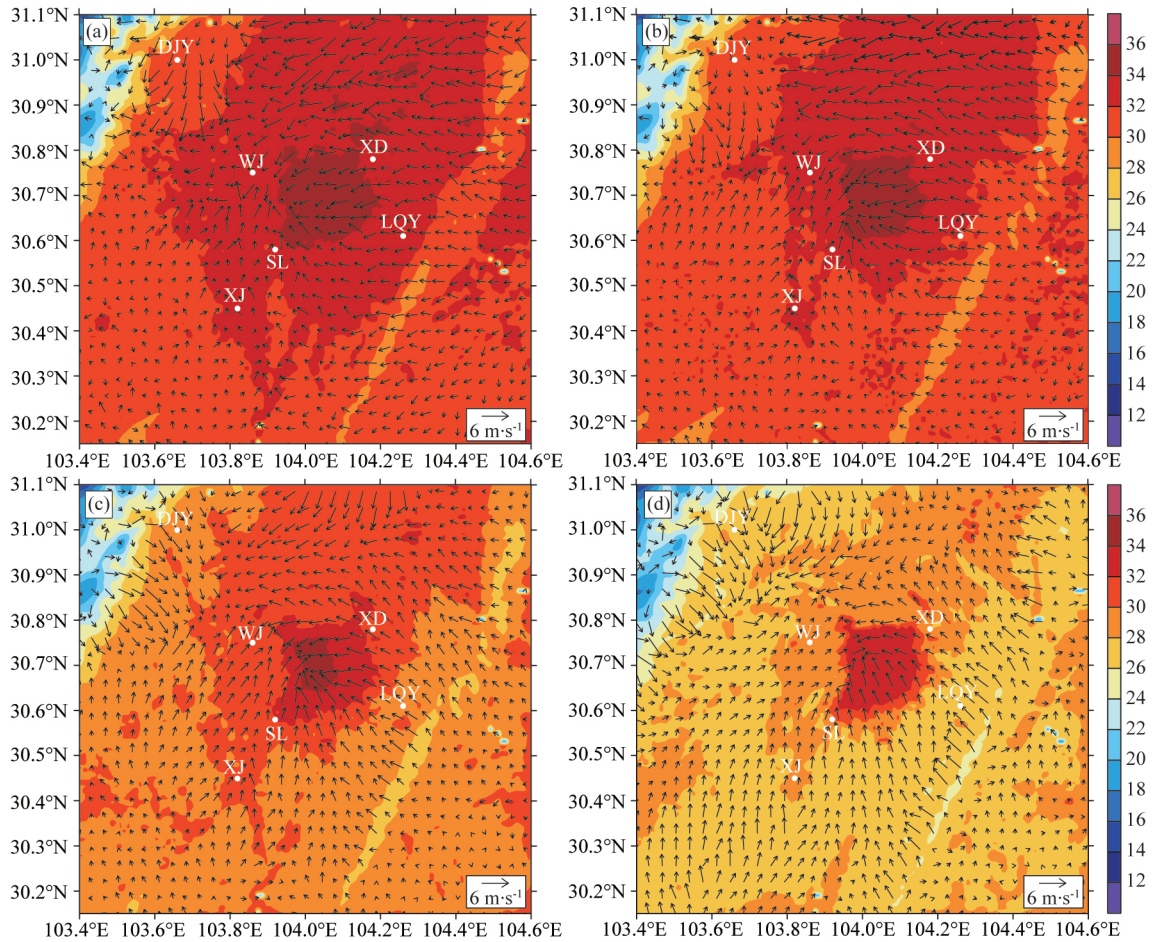


图 11 模拟的 2 m 温度(阴影,单位:°C),10 m 风场(矢量,单位: $m \cdot s^{-1}$)

(a) 17:00; (b) 18:00; (c) 19:00; (d) 20:00.

Fig. 11 Simulated 2 m temperature (shaded, unit: °C), 10 m wind field (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$)

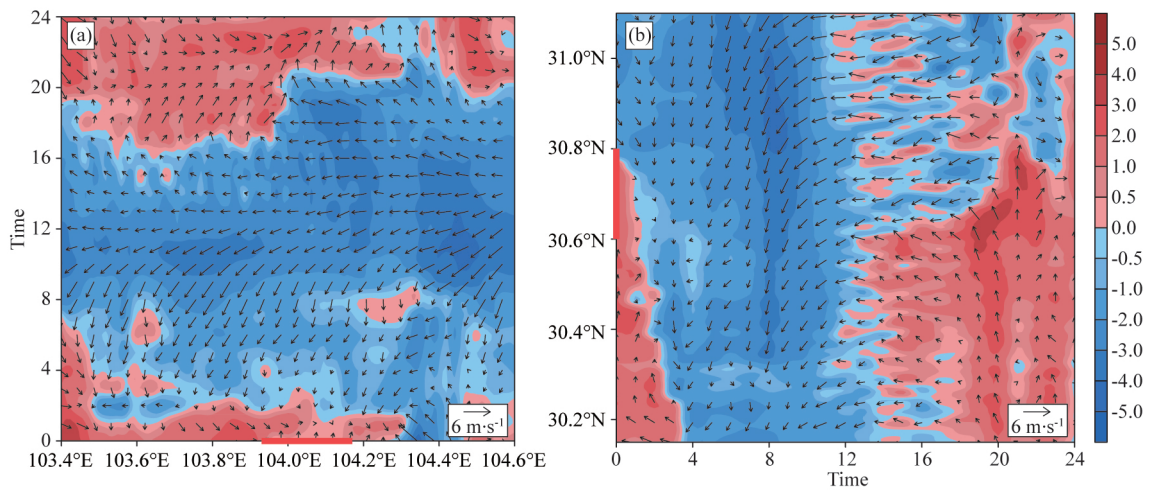


图 12 模拟的 10 m 风场(矢量,单位: $m \cdot s^{-1}$)和沿图 3b 中(a)AB 线的纬向风(阴影,单位: $m \cdot s^{-1}$);

(b)CD 线的经向风(阴影,单位: $m \cdot s^{-1}$)随时间的演变

Fig. 12 Time evolution of simulated 10 m wind field (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$) and (a) zonal wind (shaded, unit: $m \cdot s^{-1}$)

along AB, (b) meridional wind (shaded, unit: $m \cdot s^{-1}$) along CD in Fig. 3b

乡村风的碰撞使得东侧城市上空 1.9 km 处出现较弱西风回流.此外,城市处出现三支城市风锋,分别

位于 $103.9^{\circ}E, 103.98^{\circ}E, 104.12^{\circ}E$ 处.位温场上,此时水平方向上城市两侧等位温线密集,同一高度上

城市位温高于郊区,说明热岛存在.垂直方向上,城市上空 1.9 km 以下等位温线几乎垂直分布,1.9 km 以上等位温线出现转折,不同位置处开始转折的高度不同.城市和郊区处的同一等位温线转折的高度不同,郊区的位温转折高度低于城市,且西侧郊区的位温转折高度高于东侧郊区.由于位温随高度不变表示中性层结,因此城市稳定度最弱,西侧的稳定度弱于城市东侧.稳定度是影响城市热岛环流的重要因子(Baik et al., 2007),弱的稳定度和强的热岛,有利于城市热岛环流的形成和垂直方向的发展.

18:00(图 13b)热岛增强,东、西两支城市热岛环流均增强.环流结构上,西侧环流结构更加完整,环流水平尺度扩大一倍,可达 0.2 个纬距,乡村风速增强 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,约为 $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,乡村风厚度增加,在地面以上 0.6 km 高度处回流明显;东侧环流下沉支结构更加清晰,回流出现在 1.3 km 处.

城市风锋(urban breeze front)向城市中心移动.这与 Ryu 等(2013)通过理想数值模拟指出的城市风锋最初形成于城乡交界处,随着城市热岛强度增强而向城市中心移动的特征一致. 103.9°E 处的城市风锋在西侧热岛环流的作用下不断向东传播, 103.98°E 处的城市风锋在东侧城市热岛环流的作用下向西传播,最终两支城市风锋在 103.95°E 合并增强,此时城市风锋最强上升速度可达 $1.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,可向上伸展 2.5 km 左右, 104.12°E 处的城市风锋移至 104.05°E 处.位温场上,18:00 城市两侧的 310K 线,311K 线继续向城市中心移动,城市东西侧的位温梯度均有增加,且西侧等位温线水平梯度的变化大于东侧.此外,此时城市处仍为中性层结,这有利于城市热岛环流的发展.

19:00(图 13c)环流结构最完整.两支环流的辐合位置稳定在 104°E ,环流的水平风速约 $4\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,水

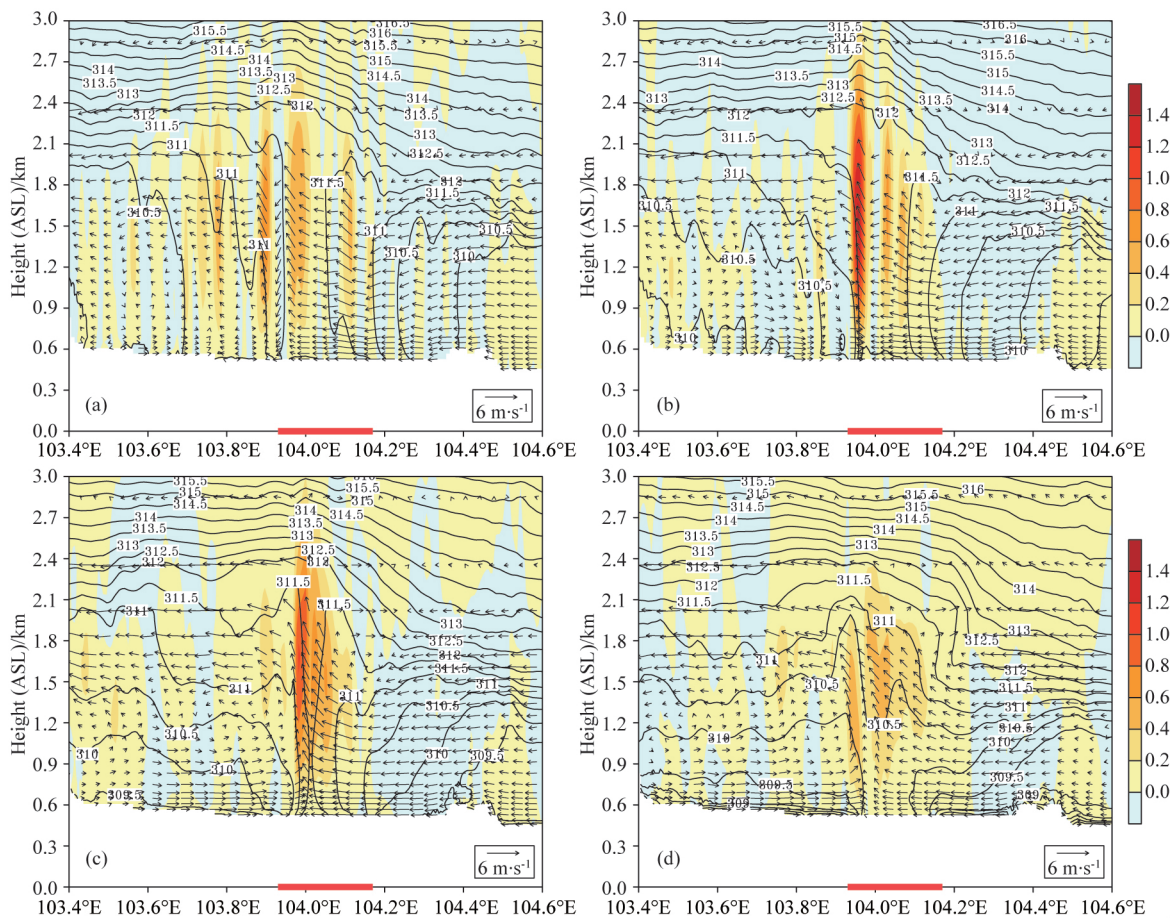


图 13 沿图 3b 中 AB 线的风场(矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, w 扩大 5 倍),垂直速度(阴影,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),位温(等值线,单位: K)的垂直剖面(横坐标上的红色线条表示城市)

(a) 17:00; (b) 18:00; (c) 19:00; (d) 20:00.

Fig. 13 Vertical cross section of wind field (vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, w multiply 5 times), w (shaded, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and theta (contour, unit: K) along AB in Fig 3b (red bar on longitudinal coordinate represents urban area)

平尺度共约为 0.4~0.5 个纬距,与 Hidalgo 等(2008a)模拟的图卢兹的城市热岛环流的水平尺度为城市规模的 2~3 倍这一观点相一致.西侧环流回流高度增加 0.1 km,东侧环流回流高度下降 0.1 km.城市处均为上升气流控制,最强上升速度略微下降约 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,这可能与城市锋后的下沉气流并入有关.位温场上,310K 和 311K 等位温线进一步向城市推进,位温水平梯度加大,为城市锋向西推进提供了动力.此外,随着等位温线进一步向城市推进,垂直方向中性层结所达到的高度由城市向两侧降低,且城市处中性层结范围缩小,不利于城市热岛环流的进一步加强.因此,之后城市热岛环流开始衰减.此外,城市东侧 1.0 km 以下位温的垂直梯度加强,不利于城市东侧热岛环流的持续,因此东侧的城市热岛环流消失较快.

由于城市处稳定度增强,20:00(图 13d)热岛环流进入衰减阶段.此时环流强度减弱,环流的水平风速降低约 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,垂直速度约减弱为 $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.从位温场特征可以看出,除城市中心较小范围受中性层结控制,其余为稳定层结.21:00(图略)城市西侧环流的水平尺度减小为 0.1 个纬距,垂直伸展高度降低为 1.1 km.城市东侧环流结构模糊.位温场特征显示成都整体受稳定边界层影响.

与东西向城市边界层风场的垂直剖面特征相类似,午后成都地区南北向风场垂直剖面上主要表现为自北向南传播的波动气流.17:00(图 14a)城市南侧出现南风,南北两侧的乡村风在 30.62°N 处汇合.城市南侧热岛环流结构清晰,低层乡村风风速较小,约为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,水平尺度约 0.1 个经距,垂直方向可向上伸展 1.5 km,地面以上 0.8 km 处出现回流.由于此时背景风较强,北侧未出现回流,环流结构不是很完整.城市处有三支较明显的城市锋,分别位于 30.62°N , 30.68°N , 30.73°N 处,其中 30.68°N 处的城市锋最强,最强上升速度约为 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.位温场上,水平方向城市处的位温始终高于同一高度郊区的位温.城市南侧的等位温线较城市北侧密集,因此南侧温度梯度大于北侧,有利于城市南侧南风的增强,使得南侧城市锋向城市推进.垂直方向上,城市南侧等位温线转折的高度低于城市北侧,说明城市南侧大气稳定度高于城市北侧.城市处位温分布均匀,地面以上 1.6 km 均处于中性层结,有利于城市热岛环流的发展.

18:00(图 14b)城市南侧乡村风增强 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,环流水平尺度扩大一倍,约 0.2 个经距,在地

面以上 0.8 km 处出现回流;北侧乡村风也有增强,但高空回流依旧不明显.城市南侧 30.62°N 处的城市锋向北推进,最终与 30.68°N 处的城市锋在 30.64°N 合并,南支城市热岛环流最大上升速度可达 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.311.5 K 等位温线的位置与城市锋的位置相对应,城市南侧边缘处位温梯度加大,加强了城市南侧偏南风,有利于城市锋的推进.

19:00(图 14c)城市锋在 30.68°N 相遇,城市处上升运动范围扩大,最大上升速度约 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.此时城市南侧乡村风增强,风速较 18:00 最大增加 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,环流水平尺度较 18:00 扩大,约为 0.3 个经距,环流厚度达 2 至 2.5 km.北侧的城市热岛环流结构清晰,地面以上 1.5 km 处有明显的回流,该环流的水平尺度约 0.15 个经距.位温场上城市南侧的位温梯度加大,偏南风加大,南支城市热岛环流进一步向城市推进;北侧城市边缘处位温梯度也加大,有利于北侧城市锋向城市中心移动.此时南北两侧的 311.5K 等位温线距离很近,也说明两支城市热岛环流的前锋相遇.

之后,城市稳定度逐渐增强,抑制了城市热岛环流的发展,城市热岛环流进入消亡阶段.20:00(图 14d)城市热岛环流的水平尺度略微减小,最大上升速度较上一时刻无明显变化,但范围缩小,城市处的平均垂直运动速度较上一时刻减小.21:00(图略)成都近地面风场总体受南风控制,南侧城市热岛环流与背景风耦合形成一个大的环流圈,环流上升支约在 30.82°N 附近,最大上升速度约 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.北侧的环流结构几乎被背景风掩盖,仅在 30.95°N 还能看到环流的下沉支.城市位温总体表现为随高度升高的特征,说明城市受稳定层结控制.

综上所述,城市热岛环流发展速度快,但维持时间较短,持续约 5 个小时.17:00—19:00 城市热岛环流处于发展阶段,这一阶段环流受热岛激发,随热岛增强而增强(Miao, 1987; Han and Baik, 2008),中性层结有利于城市热岛环流的发展.其中 17:00—18:00 乡村风风速增强,城乡边界处出现城市锋,且随着热岛的增强,城市锋不断向城市中心推进,推进速度最快.19:00 城市锋在城市中心合并,城市处总体受上升气流控制,高空回流明显,城市热岛环流结构最清晰.此时环流水平尺度最大,约 0.4~0.5 个纬距,垂直厚度约 2.0 km,最大上升速度约 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.19:00 之后城市处稳定度增强,环流进入衰减阶段.尽管 20:00 城市热岛强度增强,但此时稳定度增强对环流的抑制作用占主导,环流开始

减弱,主要表现为城市处垂直运动速度减小. 21:00,城市热岛强度也开始减弱,环流大大减弱,此时环流三维结构被破坏,仅在城市低层还存在微弱的乡村风,看不到高层辐散的特征. 本文模拟的环流结构与 Lemonsu 和 Massion(2002)和 Hidalgo 等(2008a)模拟的结构相类似,但环流达到最强的时间有所区别,这可能是由于成都处于独特的盆地地形之中(段静鑫等, 2018),城市热岛演变特征有所不同.

5 气溶胶光学厚度对城市热岛环流结构的影响

研究表明,污染加重会影响局地环流的强度(Yang et al., 2016),目前关于污染对城市热岛环流影响的定量分析较少. 气溶胶光学厚度为 0.2 表示大气较为清洁(郑小波等, 2012),因此本文设计

气溶胶光学厚度为 0.2 的敏感性试验,称为 AOD 试验. 通过与 CNTL 试验(AOD 设为 1.0)对比,定量分析污染对热岛环流的影响.

对比图 11 和图 15,可见气溶胶光学厚度减小后,成都地区 2 m 温度有不同程度的升高,其中城市附近高温区范围增加明显. 温度场的差异会引起风场的差异,最终城市处风场结构发生变化. 17:00 成都总体受偏东风控制,但城市西侧和南侧均开始吹乡村风,城市北侧 30.8°N 附近乡村风尚未形成. 18:00 城市北侧乡村风形成,向南推进至 30.71°N,南侧的乡村风与 CNTL 试验相比较弱,仅向北推进至 30.61°N. 此时双流到温江这一段出现了一个范围较小的辐散场,这一辐散场的存在使得西侧的乡村风向东推入距离比 CNTL 试验更深,与东侧乡村风在 104°E 辐合. 故这一阶段两个试验在乡村风向城市推进的距离上差异较明显. 19:00 是乡村风发

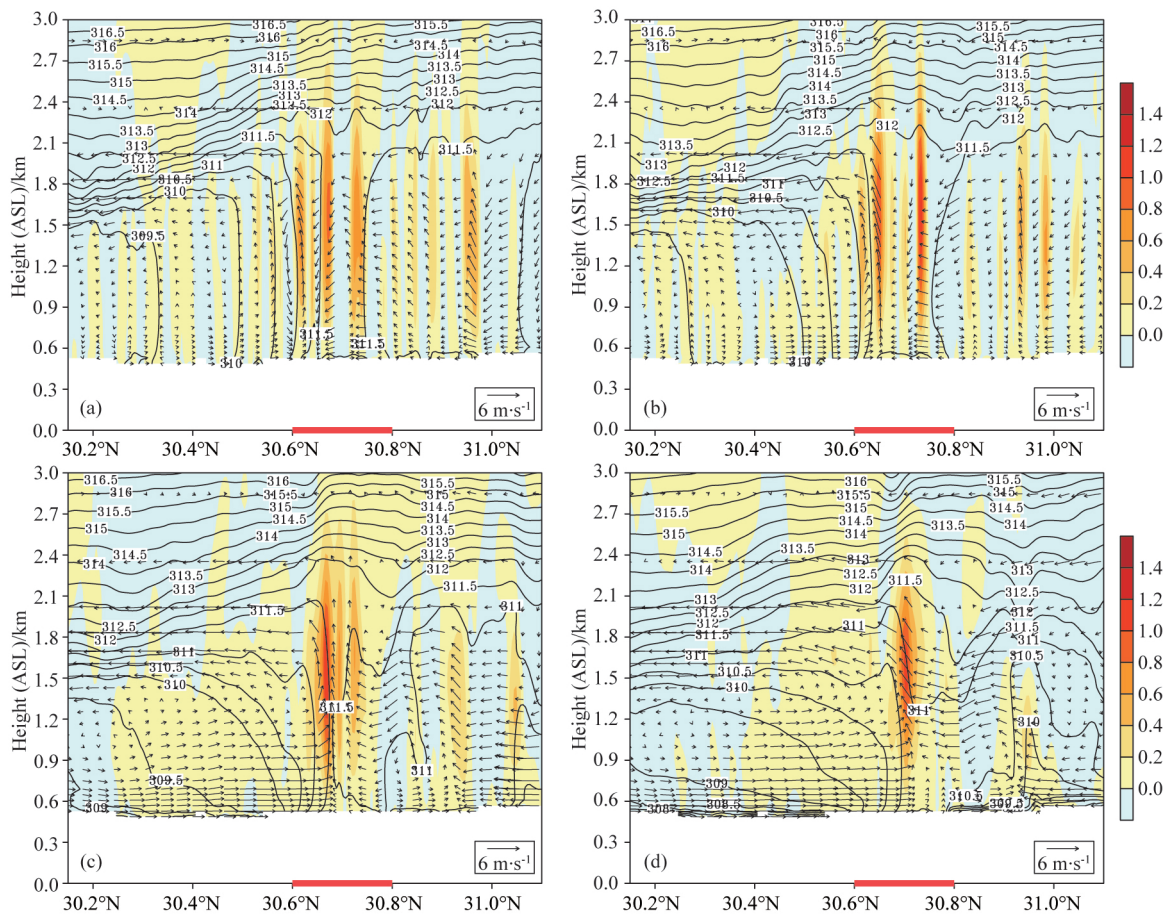


图 14 沿图 3b 中 CD 线的风场(矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, w 扩大 5 倍),垂直速度(阴影,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),位温(等值线,单位: K)的垂直剖面(横坐标上的红色线条表示城市)

(a) 17:00; (b) 18:00; (c) 19:00; (d) 20:00.

Fig. 14 Vertical cross section of wind field (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, w multiply 5 times), w (shaded, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and theta (contour, unit: K) along CD in Fig 3b (red bar on latitudinal coordinate represents urban area)

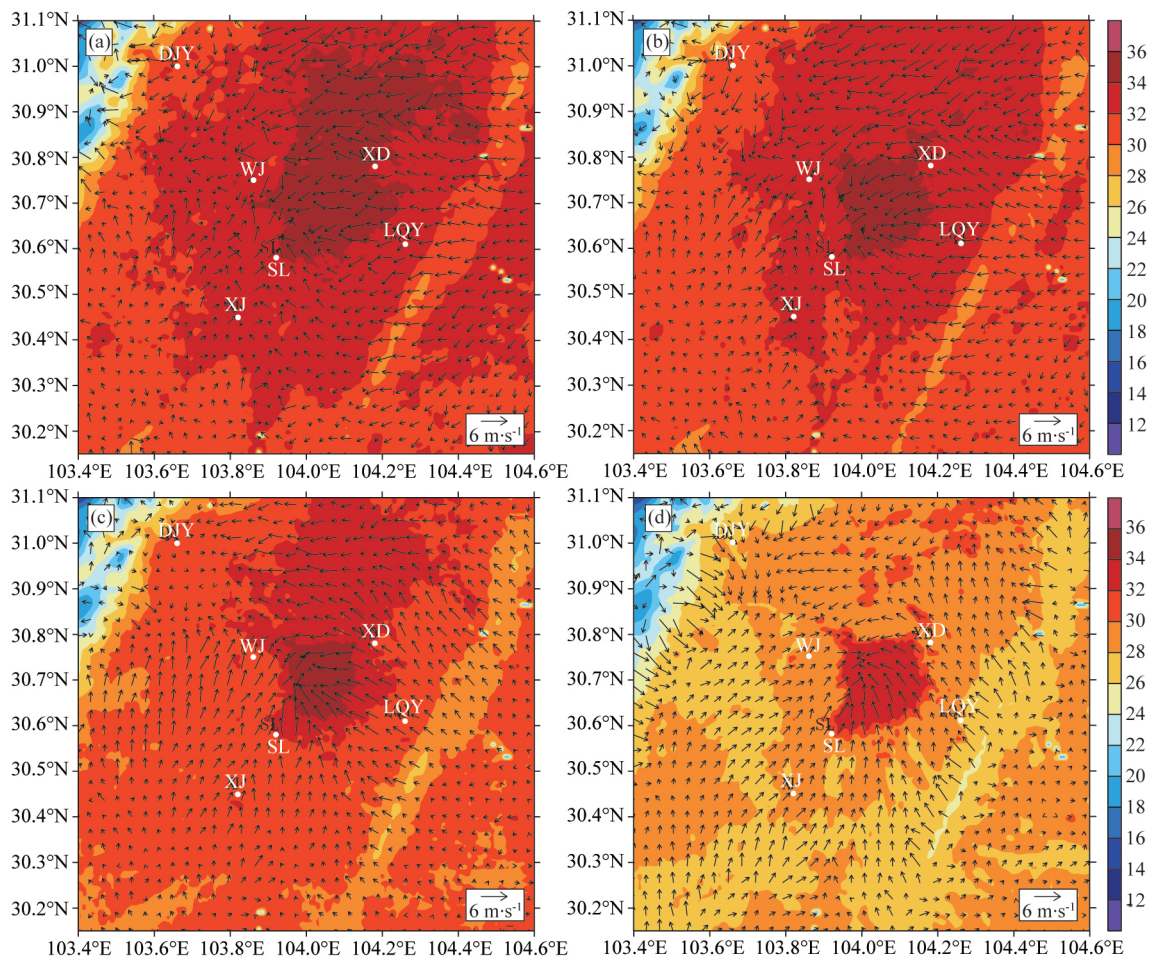


图 15 AOD 试验模拟的 2 m 温度(阴影,单位: $^{\circ}\text{C}$), 10 m 风场(矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

(a) 17:00; (b) 18:00; (c) 19:00; (d) 20:00.

Fig. 15 Simulated 2 m temperature (shaded, unit: $^{\circ}\text{C}$), 10 m wind field (vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) of AOD experiment

展最强的时刻,此时城市周围的乡村风在(103.98°E , 30.68°N)处汇合,辐合位置较 CNTL 试验偏西 0.02 个纬距. 20:00 城市热岛范围缩小,乡村风风速减小,乡村风辐合中心约在(103.98°E , 30.72°N). 与 CNTL 试验相比,主要差别在于乡村风的辐合位置. 21:00 乡村风逐渐消失,仅在城市中心处有残留. 与 CNTL 试验相比,此时城市处的偏南风减弱约 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,造成乡村风在城市北侧辐合强度减弱. 总体看来,气溶胶光学厚度减小后,个别位置乡村风出现时间推迟,乡村风风速减弱,且辐合中心位置和强度也略有变化. 19:00 两个试验乡村风特征差别最大.

19:00 城市热岛环流结构最完整,与 CNTL 试验差别最大. 东西方向上(图 16a),城市西侧温度梯度减小,造成低层乡村风减弱 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均乡村风厚度约 1.1 km,较 CNTL 试验降低 0.1 km;城市东侧 1.0 km 范围内乡村风无明显变化,高空回流影响范围较 CNTL 试验扩大. 由于城市西侧乡村

风减弱,最终造成乡村风的辐合位置约在 103.98°E 处,较 CNTL 试验偏西 2 km 左右. 此时城市两侧的城市风锋汇合,最大上升速度约 $0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,较 CNTL 试验减弱 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,城市处上升运动的范围也有所削减. 南北方向上(图 16b),气溶胶光学厚度减小后,城市北侧温度梯度减弱,乡村风速度减小约 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,造成北侧城市风锋向城市的推进速度减弱,故 19:00 城市处的城市风锋未合并. 由于此时南侧城市风锋的最大垂直速度尚未受锋前下沉气流影响减弱,因此城市南侧的城市风锋最大上升速度较 CNTL 试验强 $0.1\sim 0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,但整个城市处的平均垂直速度较 CNTL 试验减弱(图略). 位温场上,此时城市处于中性层结的范围较 CNTL 试验大,说明气溶胶光学厚度减小后稳定度减弱.

为了更详细地比较该时刻两个试验城市热岛环流的差异,本文参考表示海风特征参数(Miao et al., 2003; 杨秋彦等, 2017),给出相应描述城市热岛环流特征的参数. 表 2 和 3 是分别沿 30.68°N 和

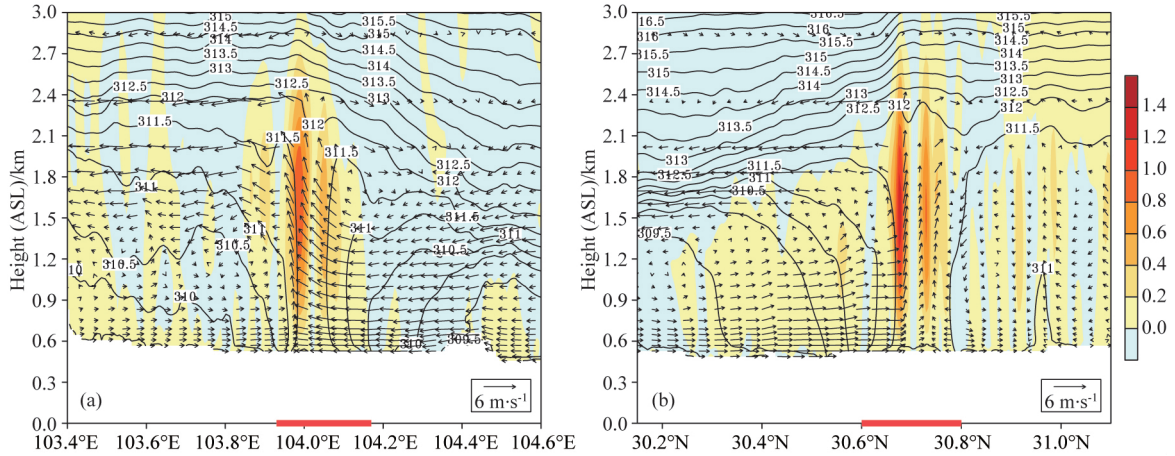


图 16 AOD 试验模拟的 19:00 沿图 3b 中(a)AB 线;(b)CD 线风场(矢量,单位: $m \cdot s^{-1}$, w 扩大 5 倍), 垂直速度(阴影,单位: $m \cdot s^{-1}$),位温(等值线,单位: K)的垂直剖面

Fig. 16 Vertical cross section of wind field (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$, w multiply 5 times), w (shaded, unit: $m \cdot s^{-1}$) and theta (contour, unit: K) along (a) AB, (b) CD in Fig. 3b (red bar on longitudinal or latitudinal coordinate represents urban area) of AOD experiment at 19:00

104°E 城市热岛环流的特征参数. 其中, L 表示城市热岛环流的水平尺度, H 为热岛环流转向高度(叶

表 2 19:00 沿 30.68°N 城市热岛环流的特征参数
Table 2 Parameters of urban heat island circulation along 30.68°N at 19:00

参数	单位	西		东	
		CNTL	AOD	CNTL	AOD
L	km	25	19	28	44
H (AGL)	km	0.7	0.6	1.1	1.1
D	km	7	6	14	15
U_{max}	$m \cdot s^{-1}$	3.30	2.02	3.9	4.0
$W \uparrow_{max}$	$m \cdot s^{-1}$	1.19	0.93	0.98	1.01
$W \downarrow_{max}$	$m \cdot s^{-1}$	0.1	0.23	0.12	0.24
UBCI	$m^2 \cdot s^{-2}$	4.26	2.34	4.30	4.95

表 3 19:00 沿 104°E 城市热岛环流的特征参数
Table 3 Parameters of urban heat island circulation along 104°E at 19:00

参数	单位	南		北	
		CNTL	AOD	CNTL	AOD
L	km	57	46	14	11
H (AGL)	km	0.9	0.7	1.3	1.0
D	km	10	11	10	7
V_{max}	$m \cdot s^{-1}$	4.41	3.92	2.41	1.21
$W \uparrow_{max}$	$m \cdot s^{-1}$	1.13	1.22	0.80	0.68
$W \downarrow_{max}$	$m \cdot s^{-1}$	0.14	0.14	0.37	0.40
UBCI	$m^2 \cdot s^{-2}$	5.60	5.33	2.81	1.31

卓佳和关虹, 1986), D 表示乡村风(城市风锋)向城市传播的距离. U_{max} 和 V_{max} 分别表示东西向和南北向低层乡村风的最大水平分量. $W \uparrow_{max}$ 和 $W \downarrow_{max}$ 分别表示热岛环流上升支和下沉支的最大速度. UBCI 是描述城市热岛环流强度的综合指标, 定义方法如下:

$$\begin{aligned} \text{纬向 UBCI} &= U_{max} \times (W \uparrow_{max} + W \downarrow_{max}); \\ \text{经向 UBCI} &= V_{max} \times (W \uparrow_{max} + W \downarrow_{max}). \end{aligned}$$

可以看出, 气溶胶光学厚度减小后, 除东侧环流水平尺度扩大, 城市热岛环流水平尺度总体减小; 环流的转向高度降低, 乡村风的最大水平分量减小. 环流的最大上升速度减弱(城市南侧除外), 最大下沉速度增强. 根据 UBCI 看出, 气溶胶光学厚度减小后, 城市热岛环流强度有不同程度的减弱(东侧环流除外).

综上所述, 气溶胶光学厚度减小后, 城市热岛环流结构特征发生改变, 在 19:00 差异最明显. 该时刻乡村风风速减小, 环流的水平尺度减小, 垂直速度减弱. 这一结论与李乐泉等(1992)通过数值模拟研究发现的“气溶胶存在使夜间热岛环流的最大上升速度增强的结论相一致”.

6 气溶胶光学厚度影响城市热岛环流的可能机制

气溶胶光学厚度是表征气溶胶对光吸收作用的物理量, 研究表明气溶胶会影响天气尺度辐射强迫, 改变大气加热率, 影响大气活动, 且气溶胶

浓度越大,对辐射的影响越大(Wang et al., 2009; 廖礼等, 2015; 王昕然等, 2018),因此本文从辐射与能量平衡角度出发探究气溶胶光学厚度影响热岛环流的可能机制.图 17a 显示,气溶胶光学厚度减弱后,白天城市和乡村的净辐射均增加,平均可增加 $36 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,因此用于地表与大气交换的能量增加,最终城市和乡村的温度均有增加.这一特征与马欣等(2016)研究发现的的气溶胶浓度增加,净辐射下降,近地面温度降低的特征相一致.

由于城市和乡村各项地表能量通量对辐射强迫的响应不同,造成城市和乡村的各项能量通量与 CNTL 试验相比增加幅度不同,最终城乡地表能量通量差异与 CNTL 试验不同(对比图 10 和图 17b).总体表现为气溶胶光学厚度减小后,白天以城乡感热通量差异和潜热通量差异增加为主,夜间以土壤热通量差异增加为主(图 18a).城乡感热及土壤热通量的差异是造成城市热岛的主要原因,因此感热及土壤热通量差异的增加有利于城市热岛的增强.已有研究表明,地表能量平衡改变除影响边界层的热力属性外,也会影响大气稳定性及混合层高度等边界层动力属性特征(Christen and Vogt, 2004).图 18c 表明气溶胶光学厚度减小后,成都边界层低层温度以增加为主,高层以减小为主,温度的垂直梯度增加,大气稳定性减弱.根据城市地区平均边界层高度随时间的演变特征(图 19a)也可以看出,气溶胶光学厚度减小后,城市大气稳定度减弱(Hidalgo et al., 2010; Zhang et al., 2014).此外,气溶胶光学厚度减小后,边界层低层风速增加(图 18d),不利于热岛能量的积累(李国平, 1990).在以上多个因子的共同影响下,城市热岛强度除在 07:00, 16:00 和 19:00 减弱外其余时刻均增强(图 18b). 19:00

尽管城乡热通量差异增加,但边界层高度升高达 230 m(图 19a),地面以上 0.5 km 以下平均经向风速增加约 $0.5 \sim 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 1.0 km 以下平均纬向风速增加约 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 19b),导致热岛强度减弱,可达 $0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

之前的分析表明,在热岛环流增强阶段,热岛强度是决定环流强度的主要因子,强的热岛有助于激发更强的热岛环流.17:00—18:00 气溶胶光学厚度改变造成的热岛强度变化最大不超过 $0.04 \text{ }^{\circ}\text{C}$,此时热岛环流结构差异较小.19:00 气溶胶光学厚度减小后,热岛强度明显减小,此时热岛环流强度较 CNTL 试验减弱.19:00 之后城市处的边界层高度急剧下降(图 19a),稳定度增强,此时热岛增强对环流的增强效应弱于稳定度减小对环流的抑制效应,热岛环流开始衰减.综上所述,气溶胶光学厚度减小后,影响城乡地表能量差异,边界层稳定度等因子,造成城市热岛环流增强阶段热岛强度减弱,因此城市热岛环流强度减弱,水平尺度减小.

7 总结与讨论

本文利用 WRF V3.9 模式对 2016 年 7 月 16 日成都一次污染天气下的城市热岛环流结构进行模拟,并结合地面观测资料和探空资料分析了此次热岛环流的三维结构和时间演变特征.此外,通过设计气溶胶光学厚度的敏感性试验,定量探究了大气污染对城市热岛环流的可能影响.

CNTL 试验结果表明,该模式能较准确地模拟出城市热岛环流这一中小尺度环流的结构特征.该次个例中成都城市热岛环流在 17:00—21:00 出现.17:00—19:00 热岛环流处于增强阶段,这一阶

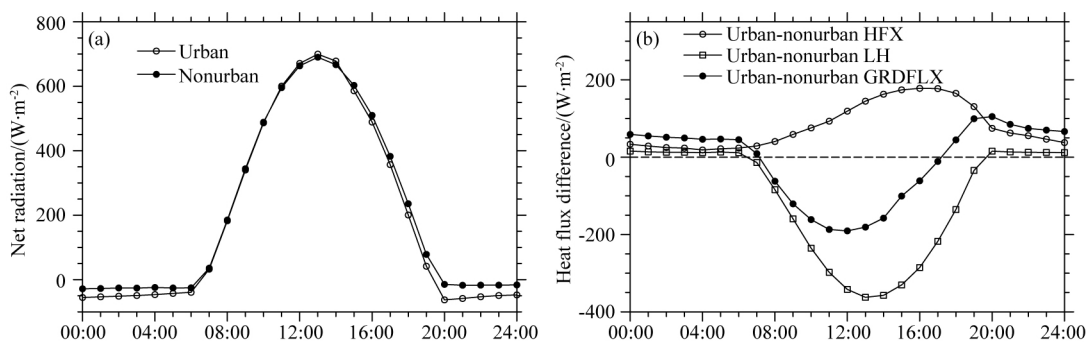


图 17 AOD 试验 D4 区域(a)城市和非城市地区净辐射通量(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$);
(b)城乡地表能量通量差异(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)随时间的变化

Fig. 17 Diurnal variation of (a) net radiation flux (unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) averaged over the urban and nonurban areas,
(b) surface heat flux difference (unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) between urban and nonurban areas of AOD experiment in D4

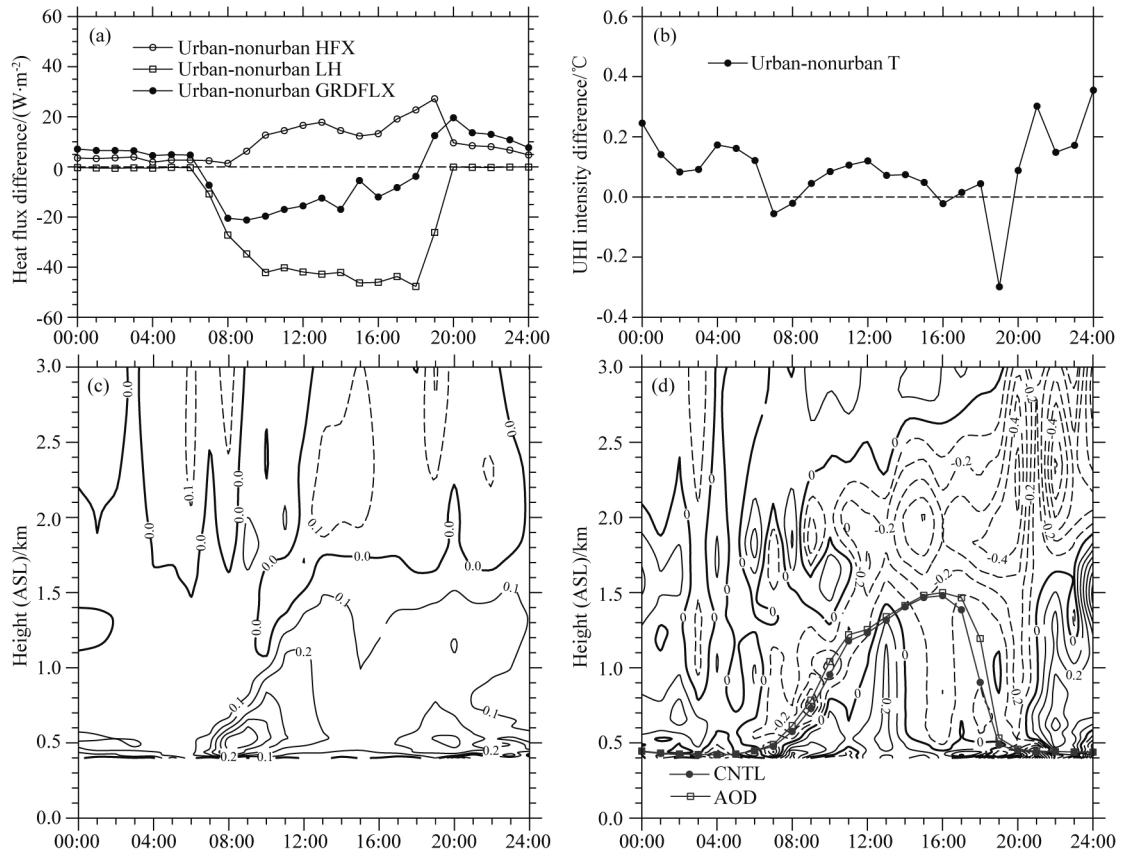


图 18 AOD 试验减去 CNTL 试验的 D4 区域平均 (a) 城乡地表能量通量差异 (单位: $W \cdot m^{-2}$); (b) 热岛强度 (单位: $^{\circ}C$); (c) 边界层温度 (单位: $^{\circ}C$); (d) 边界层风速 (单位: $m \cdot s^{-1}$, 图中浅色线条表示 D4 区域平均边界层高度) 随时间的变化
 Fig. 18 Diurnal variation of (a) surface heat flux difference (unit: $W \cdot m^{-2}$) between urban and nonurban areas, (b) urban heat island intensity (unit: $^{\circ}C$), (c) temperature (unit: $^{\circ}C$), (d) wind speed (unit: $m \cdot s^{-1}$, the light-colored lines in the diagram represent mean D4 boundary layer height) in D4 of AOD experiment minus which of CNTL experiment

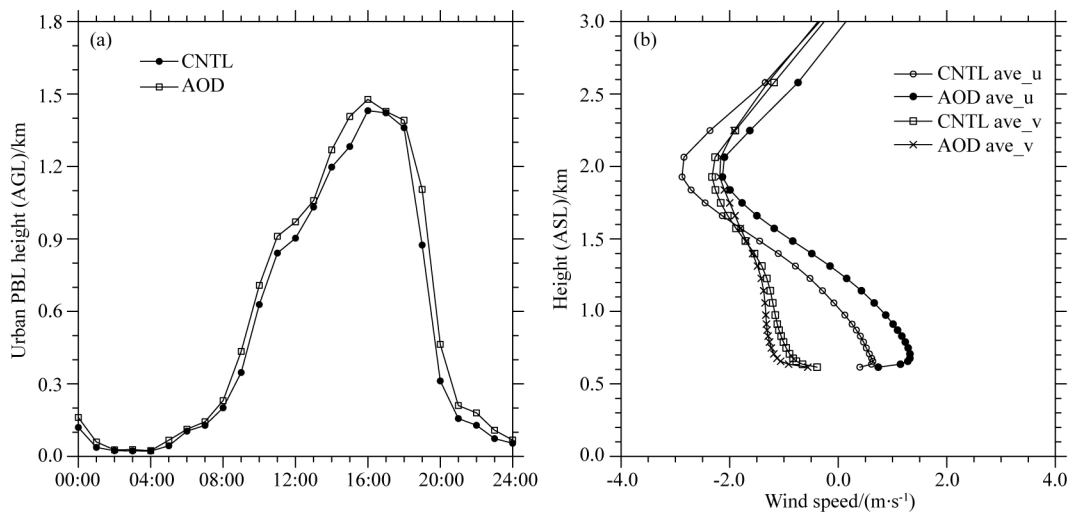


图 19 CNTL 和 AOD 试验中 D4 区域 (a) 城市边界层高度 (单位: km) 随时间的变化;
 (b) 19:00 边界层平均风速分量 (单位: $m \cdot s^{-1}$) 随高度的变化

Fig. 19 (a) Diurnal variation of urban mean boundary layer height (unit: km), (b) mean wind speed component (unit: $m \cdot s^{-1}$) varied with altitude at 19:00 of CNTL and AOD experiment in D4

段环流主要受城市热岛增强而增强,最强时环流的水平尺度约 0.4~0.5 个纬距,厚度约 2.0 km。低层乡村风风速约 $4\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,高层回流速度约 $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,城市风锋的最强上升速度可达 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。19:00 之后,城市稳定度迅速增加抑制了热岛环流的发展,热岛环流强度减弱。21:00 后热岛环流垂直结构被破坏,仅近地面存在微弱的乡村风。

气溶胶光学厚度减小,表示大气透明度较好,空气质量较好。此时,地表吸收的净辐射增多,导致城市和乡村的感热、潜热和土壤热通量分别增加,造成城乡感热和土壤热通量差异增大;此外城市感热通量增加后,降低了城市边界层大气稳定度,由于两者对城市热岛作用相反,造成 19:00 城市热岛比 CNTL 试验降低 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此时处在热岛环流的发展阶段,热岛强度减弱造成热岛环流减弱。主要表现为西、南、北三个方向环流的水平尺度分别减小 6 km、11 km、3 km,高空回流高度分别降低 0.1 km、0.2 km、0.3 km,乡村风风速平均减小约 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,西侧和南侧城市风锋的速度减小约 $0.1\sim 0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

本文仅探讨了一次污染天气下的城市热岛环流个例,结论具有一定的局限性。今后有必要通过模拟清洁天气下的城市热岛环流的特征来验证本文半理想试验的发现。

References

- Bach W. 1970. An urban circulation model. *Archiv für Meteorologie, Geophysik Und Bioklimatologie, Serie B*, 18(2): 155-168.
- Baik J J, Kim Y H, Kim J J, et al. 2007. Effects of boundary-layer stability on urban heat island-induced circulation. *Theoretical and Applied Climatology*, 89(1-2): 73-81.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129(4): 569-585.
- Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. 2011. The integrated WRF/urban modelling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology*, 31(2): 273-288.
- Cheng Z G, Yang X Y, Sun C, et al. 2016. The trend of summer urban heat island effect and its relationship with urban development in Chengdu. *Climate Change Research* (in Chinese), 12(4): 322-331.
- Christen A, Vogt R. 2004. Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology*, 24(11): 1395-1421.
- Dong G H, Wei Y H, Xie Y Y, et al. 2015. Research on the interaction of Tianjin urban heat island circulation and sea breeze circulation. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 41(12): 1447-1455.
- Dong L, Huang R. 2014. Climate adaptive planning for urban green roof system Chengdu case study. *Landscape Architecture* (in Chinese), 10(5): 103-106.
- Duan J X, Zhao T L, Xu X D, et al. 2018. Simulation of basin topography impacts on rainstorm in Sichuan. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 29(3): 307-320.
- Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. 2003. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22): 8851, doi: 10.1029/2002JD003296.
- Eliasson I, Holmer B. 1990. Urban heat island circulation in Göteborg, Sweden. *Theoretical and Applied Climatology*, 42(3): 187-196.
- Han J Y, Baik J J. 2008. A theoretical and numerical study of urban heat island-induced circulation and convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65(6): 1859-1877.
- Han J Y, Baik J J, Lee H. 2014. Urban impacts on precipitation. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(1): 17-30.
- He X F, Jiang W M, Chen Y, et al. 2007. Numerical simulation of the impacts of anthropogenic heat on the structure of the urban boundary layer. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 50(1): 74-82.
- Hidalgo J, Masson V, Pigeon G. 2008a. Urban-breeze circulation during the CAPITOUL experiment: Numerical simulations. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3-4): 243-262.
- Hidalgo J, Pigeon G, Masson V. 2008b. Urban-breeze circulation during the CAPITOUL experiment: Observational data analysis approach. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3-4): 223-241.
- Hidalgo J, Masson V, Gimeno L. 2010. Scaling the daytime urban heat island and urban-breeze circulation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(5): 889-901.
- Huang L P, Miao J F, Liu Y K. 2012. Spatial and temporal variation characteristics of urban heat island in Tianjin. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35(5): 620-632.
- Huang Y, Fan S J. 2009. Numerical simulation of the meteorological conditions during a regional haze episode in Pearl River Delta city cluster. *Journal of the Graduates Sun Yat-Sen University (Natural Sciences, Medicine)* (in Chinese), 30(1): 78-92.
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D13): D13103, doi: 10.1029/2008JD009944.
- Janjić Z I. 1994. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, 122(5): 927-945.
- Jiang W M, Chen Y. 2007. The impact of anthropogenic heat on urban boundary layer structure. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31(1): 37-47.

- Ju L X, Wang Q G, Zhang M G, et al. 2003. A simulation of heat island circulation and mountain-valley breeze in Jinan. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 8(4): 467-474.
- Kain J S. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of Applied Meteorology*, 43(1): 170-181.
- Kusaka H, Kimura F. 2004. Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82(1): 67-80.
- Lemonsu A, Masson V. 2002. Simulation of a summer urban breeze over Paris. *Boundary-Layer Meteorology*, 104(3): 463-490.
- Li G P. 1990. The dynamical and numerical analyses on the urban thermal-mountain wave. *Journal of Chengdu University of Information Technology* (in Chinese), 15(1): 14-21.
- Li L Q, Zhou M Y, Li X S. 1992. The interaction between nocturnal urban atmospheric boundary layer and aerosols. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 3(1): 32-41.
- Li M H, Fan S J, Wang B M, et al. 2008. Observation study on the temperature and wind profiles over the Pearl River Delta in autumn. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 19(1): 53-60.
- Li M M, Song Y, Huang X, et al. 2014. Improving mesoscale modeling using satellite-derived land surface parameters in the Pearl River Delta region, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(11): 6325-6346.
- Li X J, Liu Y J, Qiu H, et al. 2003. Retrieval method for optical thickness of aerosols over Beijing and its vicinity by using the MODIS data. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 61(5): 580-591.
- Li X M, Zeng S L. 2015. Comparative research on characteristics of urban heat island effects between Chengdu and Chongqing. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 43(5): 888-897.
- Li Z J, Zeng S L. 2016. The research of heat island effect in Chengdu based on WRF model. *Journal of Chengdu University of Information Technology* (in Chinese), 31(6): 629-636.
- Liao L, Lou S J, Fu Y, et al. 2015. Radiative forcing of aerosols and its impact on surface air temperature on synoptic scale in eastern China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 39(1): 68-82.
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(6): 1065-1092.
- Liu S H, Liu Z X, Li J, et al. 2009. Numerical simulation for the coupling effect of local atmospheric circulations over the area of Beijing, Tianjin and Hebei province. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(3): 382-392.
- Liu S H, Liu Z X, Ma Y J, et al. 2008. Strategic thinking of sustainability for the coupling effect of local atmospheric circulations over the area of Beijing, Tianjin and Hebei province. *Frontier Science* (in Chinese), 2(4): 61-74.
- Liu X Y, Chen Q L, Che H Z, et al. 2016. Spatial distribution and temporal variation of aerosol optical depth in the Sichuan basin, China, the recent ten years. *Atmospheric Environment*, 147: 434-445.
- Liu Z X, Liu S H, Hu F, et al. 2012. A comparison study of the simulation accuracy between WRF and MM5 in simulating local atmospheric circulations over Greater Beijing. *Science China Earth Sciences*, 55(3): 418-427.
- Ma X, Chen D S, Wen W, et al. 2016. Effect of particle pollution on regional meteorological factors in China. *Journal of Beijing University of Technology* (in Chinese), 42(2): 285-295.
- Miao J F, Kroon L J M, De Arellano J V G, et al. 2003. Impacts of topography and land degradation on the sea breeze over eastern Spain. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 84(3-4): 157-170.
- Miao J F. 2014. An overview of numerical studies of interaction of urban heat island and sea breeze circulations. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37(4): 521-528.
- Miao M Q. 1987. Numerical modeling of the nocturnal PBL over the urban heat island in Changzhou city. *Boundary-Layer Meteorology*, 41(1-4): 41-56.
- Munn R E. 1973. Urban meteorology: Some selected topics. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 54(2): 90-93.
- Ning G C, Wang S G, Ma M J, et al. 2018. Characteristics of air pollution in different zones of Sichuan Basin, China. *Science of the Total Environment*, 612: 975-984.
- Ryu Y H, Baik J J, Han J Y. 2013. Daytime urban breeze circulation and its interaction with convective cells. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(671): 401-413.
- Savijärvi H, Liya J. 2001. Local winds in a valley city. *Boundary-Layer Meteorology*, 100(2): 301-319.
- Seo J M, Ganbat G, Baik J J. 2017. Dynamics of reversed urban breeze circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 74(4): 1311-1320.
- Shreffler J H. 1978. Detection of centripetal heat-island circulations from tower data in St. Louis. *Boundary-Layer Meteorology*, 15(2): 229-242.
- Su T, Miao J F, Wang Y H. 2017. Impact of radiative transfer parameterizations on simulated sea breeze thunderstorm over the Hainan Island. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(8): 3023-3040, doi: 10.6038/cjg20170811.
- Wang H L, Zhang L, Chen C H, et al. 1999. An analysis of the winter low level wind field and temperature field of Lanzhou city's eastern area. *Journal of Lanzhou University (Natural Science)* (in Chinese), 35(4): 117-123.
- Wang K C, Chen C H, Zhang L, et al. 2004. Observational study on character of boundary layer and low-level temperature advection over transition zone between urban and rural. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 23(4): 529-533.
- Wang S, Liao T T, Wang L L, et al. 2015. Atmospheric characteristics of a serious haze episode in Xi'an and the influence of meteorological conditions. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 35(11): 3452-3462.

- Wang X R, He X D, Miao S G, et al. 2018. Numerical simulation of the influence of aerosol radiation effect on urban boundary layer. *Science China Earth Sciences*, 61(12): 1844-1858.
- Wang Y, Che H Z, Ma J Z, et al. 2009. Aerosol radiative forcing under clear, hazy, foggy, and dusty weather conditions over Beijing, China. *Geophysical Research Letters*, 36(6): L06804, doi: 10.1029/2009GL037181.
- Wang Y, Di Sabatino S, Martilli A, et al. 2017. Impact of land surface heterogeneity on urban heat island circulation and sea-land breeze circulation in Hong Kong. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(8): 4332-4352.
- Wang Y P, Yu X, Xie G Q. 2018. Spatial distribution and temporal variation of aerosol optical depth over China in the past 15 years. *China Environmental Science* (in Chinese), 38(2): 426-434.
- White J M, Eaton F D, Auer A H Jr. 1978. The net radiation budget of the St. Louis metropolitan area. *Journal of Applied Meteorology*, 17(5): 593-599.
- Xiao D, Chen J, Chen Z, et al. 2011. Effect simulation of Chengdu fine underlying surface information on urban meteorology. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 37(3): 298-308.
- Xu M, Jiang W M, Ji C P, et al. 2002. Numerical modeling and verification of structures of the boundary layer over Beijing area. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 13(S1): 61-68.
- Xu R, Miao J F, Tan Z M, et al. 2013. Numerical simulation of the impact of urban underlying surface characteristics on thunderstorm in Nanjing. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37(6): 1235-1246.
- Yang B S. 1988. Research on the urban hot island effect in Chengdu. *Journal of Chengdu Meteorological Institute* (in Chinese), 3(2): 50-59.
- Yang Q Y, Miao J F, Wang Y H. 2017. A numerical study of impact of topography on sea breeze circulation over the Hainan Island. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 39(3): 24-43.
- Yang Y, Fan J W, Leung L R, et al. 2016. Mechanisms contributing to suppressed precipitation in Mt. Hua of central China. Part I: Mountain valley circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73(3): 1351-1366.
- Ye Z J, Guan H. 1986. A numerical study of evolution of the nocturnal urban boundary layer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 10(1): 80-88.
- Zeng S L. 2015. Characteristics of urban heat island effect of Chengdu. *Journal of Chengdu University of Information Technology* (in Chinese), 30(1): 96-101.
- Zhang N, Wang X Y, Peng Z. 2014. Large-eddy simulation of mesoscale circulations forced by inhomogeneous urban heat island. *Boundary-Layer Meteorology*, 151(1): 179-194.
- Zhang W, Dan S M, Han L, et al. 2007. Evolution tendency analysis of urban heat island effect on Chengdu plain based on AVHRR. *Sichuan Environment* (in Chinese), 26(2): 26-29, 62.
- Zheng X B, Luo Y X, Zhao T L, et al. 2012. Geographical and climatological characterization of aerosol distribution in China. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 32(3): 265-272.
- Zhou S H, Ni C J, Liu P C. 2014. Study on the characteristics of Wenjiang boundary layer wind field in Chengdu. *Sichuan Environment* (in Chinese), 33(3): 30-35.
- Zhu L, Miao J F. 2019. Overview of urban breeze circulation studies in China. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 47(1): 52-61.
- Zhu Y, Liu H N, Shen J, et al. 2016. Influence of urban heat island on pollution diffusion in Suzhou. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 35(6): 1584-1594.

附中文参考文献

- 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. *气候变化研究进展*, 12(4): 322-331.
- 东高红, 尉英华, 解以扬等. 2015. 天津地区城市热岛环流与海风环流相互作用的研究. *气象*, 41(12): 1447-1455.
- 董靓, 黄瑞. 2014. 基于气候适应性的城市屋顶绿化系统规划研究以成都为例. *风景园林*, 10(5): 103-106.
- 段静鑫, 赵天良, 徐祥德等. 2018. 四川暴雨过程中盆地地形作用的数值模拟. *应用气象学报*, 29(3): 307-320.
- 何晓凤, 蒋维楣, 陈燕等. 2007. 人为热源对城市边界层结构影响的数值模拟研究. *地球物理学报*, 50(1): 74-82.
- 黄利萍, 苗峻峰, 刘月琨. 2012. 天津城市热岛效应的时空变化特征. *大气科学学报*, 35(5): 620-632.
- 黄义, 范绍佳. 2009. 珠江三角洲城市群一次区域性污染过程气象特征数值模拟. *中山大学研究生学刊(自然科学、医学版)*, 30(1): 78-92.
- 蒋维楣, 陈燕. 2007. 人为热对城市边界层结构影响研究. *大气科学*, 31(1): 37-47.
- 鞠丽霞, 王勤耕, 张美根等. 2003. 济南市城市热岛和山谷风环流的模拟研究. *气候与环境研究*, 8(4): 467-474.
- 李国平. 1990. 城市热山波的动力和数值分析. *成都气象学院学报*, 15(1): 14-21.
- 李乐泉, 周明煜, 李兴生. 1992. 夜间城市大气边界层和气溶胶的相互作用. *应用气象学报*, 3(1): 32-41.
- 李明华, 范绍佳, 王宝民等. 2008. 珠江三角洲秋季大气边界层温度和风廓线观测研究. *应用气象学报*, 19(1): 53-60.
- 李晓静, 刘玉洁, 邱红等. 2003. 利用 MODIS 资料反演北京及其周边地区气溶胶光学厚度的方法研究. *气象学报*, 61(5): 580-591.
- 李晓敏, 曾胜兰. 2015. 成都、重庆城市热岛效应特征对比. *气象科技*, 43(5): 888-897.
- 李肇洁, 曾胜兰. 2016. 基于 WRF 模式的成都地区热岛效应的模拟研究. *成都信息工程大学学报*, 31(6): 629-636.
- 廖礼, 漏漏佳, 符瑜等. 2015. 中国东部气溶胶在天气尺度上的辐射强迫和对地面气温的影响. *大气科学*, 39(1): 68-82.
- 刘树华, 刘振鑫, 李炬等. 2009. 京津冀地区大气局地环流耦合效应的数值模拟. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 39(1): 88-98.
- 刘树华, 刘振鑫, 马雁军等. 2008. 京津冀地区局地大气环流耦合效应与区域可持续发展的战略思考. *前沿科学*, 2(4): 61-74.
- 刘振鑫, 刘树华, 胡非等. 2012. MM5 和 WRF 对北京地区低层大

- 气局地环流模拟能力的对比研究. 中国科学: 地球科学, 42(2): 301-312.
- 马欣, 陈东升, 温维等. 2016. 应用 WRF-chem 探究气溶胶污染对区域气象要素的影响. 北京工业大学学报, 42(2): 285-295.
- 苗峻峰. 2014. 城市热岛和海风环流相互作用的数值模拟研究进展. 大气科学学报, 37(4): 521-528.
- 苏涛, 苗峻峰, 王语卉. 2017. 辐射参数化对海南岛海风雷暴结构模拟的影响. 地球物理学报, 60(8): 3023-3040, doi: 10.6038/cjg20170811.
- 王海龙, 张镭, 陈长和等. 1999. 兰州市东部地区冬季低空风场和温度场分析. 兰州大学学报(自然科学版), 35(4): 117-123.
- 王开存, 陈长和, 张镭等. 2004. 城乡过渡地带低空温度平流和边界层特征的观测分析. 高原气象, 23(4): 529-533.
- 王珊, 廖婷婷, 王莉莉等. 2015. 西安一次霾重污染过程大气环境特征及气象条件影响分析. 环境科学学报, 35(11): 3452-3462.
- 王银牌, 喻鑫, 谢广奇. 2018. 中国近 15 年气溶胶光学厚度时空分布特征. 中国环境科学, 38(2): 426-434.
- 王昕然, 贺晓冬, 苗世光等. 2018. 气溶胶辐射效应对城市边界层影响的数值模拟研究. 中国科学: 地球科学, 48(11): 1478-1493.
- 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. 气象, 37(3): 298-308.
- 徐敏, 蒋维楣, 季崇萍等. 2002. 北京地区气象环境数值模拟试验. 应用气象学报, 13(S1): 61-68.
- 徐蓉, 苗峻峰, 谈哲敏等. 2013. 南京地区城市下垫面特征对雷暴过程影响的数值模拟. 大气科学, 37(6): 1235-1246.
- 杨柏生. 1988. 成都城市热岛效应研究. 成都气象学院学报, 3(2): 50-59.
- 杨秋彦, 苗峻峰, 王语卉. 2017. 海南岛地形对局地海风环流结构影响的数值模拟. 海洋学报, 39(3): 24-43.
- 叶卓佳, 关虹. 1986. 夜间城市边界层发展的数值研究. 大气科学, 10(1): 80-88.
- 曾胜兰. 2015. 成都市城市热岛效应分析. 成都信息工程学院学报, 30(1): 96-101.
- 张伟, 但尚铭, 韩力等. 2007. 基于 AVHRR 的成都平原城市热岛效应演变趋势分析. 四川环境, 26(2): 26-29, 62.
- 郑小波, 罗宇翔, 赵天良等. 2012. 中国气溶胶分布的地理学和气候学特征. 地理科学, 32(3): 265-272.
- 周明煜, 曲绍厚, 李玉英等. 1980. 北京地区热岛和热岛环流特征. 环境科学, 3(5): 12-18.
- 周书华, 倪长健, 刘培川. 2014. 成都市温江边界层风场特征的研究. 四川环境, 33(3): 30-35.
- 朱丽, 苗峻峰. 2019. 中国地区城市热岛环流研究进展. 气象科技, 47(1): 52-61.
- 朱焱, 刘红年, 沈建等. 2016. 苏州城市热岛对污染扩散的影响. 高原气象, 35(6): 1584-1594.

(本文编辑 汪海英)