

朱丽, 苗峻峰, 高阳华. 2020. 重庆城市热岛环流结构和湍流特征的数值模拟 [J]. 大气科学, 44(3): 657–678. ZHU Li, MIAO Junfeng, GAO Yanghua. 2020. A Numerical Simulation of Urban Breeze Circulation Structure and Turbulence in Chongqing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(3): 657–678. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.19239

重庆城市热岛环流结构和湍流特征的数值模拟

朱丽^{1,3} 苗峻峰¹ 高阳华²

¹ 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

² 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147

³ 泰州市气象局, 江苏泰州 225500

摘 要 利用中尺度模式 WRF (V3.9) 对 2016 年 8 月 17~18 日重庆一次城市热岛环流个例进行了数值模拟, 探讨了山地城市热岛环流的三维结构和演变特征, 分析了热岛环流期间湍流动能和各项湍流通量的特征。结果表明: 15:00 (北京时, 下同) 乡村风开始出现, 随着热岛强度增强乡村风增大, 18:00 热岛环流结构最显著, 次日 02:00 热岛环流结构被破坏, 仅低层存在微弱的乡村风。其中, 重庆市城市热岛环流最强时, 水平尺度约城市尺度的 1.5~2 倍, 垂直厚度约 1.3 km, 水平风速约 2~4 m s⁻¹, 最大上升速度约 0.5 m s⁻¹。受地形、河流以及背景风的影响, 环流呈现非对称的结构, 且强度较弱。湍流特征分析结果表明, 城市区域的湍流动能明显大于其它区域。此外, 城市热岛环流通过湍流运动将郊区的水汽输向城市; 高层湍流动量补充边界层中因热岛环流发展而造成的动量耗散。

关键词 复杂地形 城市热岛环流 山谷风 江陆风 湍流动能 湍流通量

文章编号 1006-9895(2020)03-0657-22

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.19239

A Numerical Simulation of Urban Breeze Circulation Structure and Turbulence in Chongqing

ZHU Li^{1,3}, MIAO Junfeng¹, and GAO Yanghua²

¹ College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147

³ Taizhou Meteorological Bureau, Taizhou, Jiangsu Province 225500

Abstract To investigate the structure and evolution of urban breeze circulation in a mountain city, we used the Weather Research and Forecasting model (V3.9) to simulate the typical urban breeze circulation from August 17 to 18, 2016 in Chongqing. We also analyzed the turbulent kinetic energy and turbulent fluxes during this period. The results show that the rural wind begins at 1500 BT (Beijing time) and increases as the heat island strengthens. The circulation reaches its maximum at 1800 BT and subsides at 0200 BT the next day. At 1800 BT, the horizontal scale of the rural wind circulation

收稿日期 2019-10-26; 网络预出版日期 2020-03-18

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, E-mail: miaoj@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划重点专项项目 2018YFC1506902, 重庆市社会事业与民生保障科技创新专项 cstc2015shmszx00010, 中国气象局省级气象科研所科技创新发展经费项目 SSCX201917

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFC1506902), Science and Technology Innovation Project of Social Undertakings and Livelihood Security in Chongqing (Grant cstc2015shmszx00010), Fund Project of Scientific and Technological Innovation Development of Provincial Meteorological Research Institute, China Meteorological Administration (Grant SSCX201917)

is about 1.5–2 times that of the urban area, with a vertical scale of about 1.3 km, a horizontal wind speed of about $2\text{--}4\text{ m s}^{-1}$, and a maximum rate of increase of about 0.5 m s^{-1} . Due to the influence of the topography, rivers, and background wind, the circulation is weak and has an asymmetrical structure. We also found the turbulent kinetic energy in urban areas to be obviously larger than that in nonurban areas, which means that urban areas experience stronger transports of heat and water vapor by turbulence. With respect to the relationship between turbulent fluxes and urban breeze circulation, we found that the circulation of urban breezes transports water vapor from the suburbs to the city via turbulent motion, with the turbulence supplying momentum for dissipation of the urban breeze circulation.

Keywords Complex terrain, Urban heat island circulation, Mountain–valley breeze, River–land breeze, Turbulent kinetic energy, Turbulent flux

1 引言

城市热岛是指城市温度高于周围乡村温度的现象 (何泽能等, 2008; 黄利萍等, 2012; 何松蔚等, 2018)。由城市热岛激发出的次级环流称作城市热岛环流, 城市热岛环流在低层表现为由郊区吹向城市的气流, 称为乡村风 (Hidalgo et al., 2010; 苗峻峰, 2014; 朱丽和苗峻峰, 2019)。目前国内外对于城市热岛环流的产生原因、结构特点已有一部分认识, 研究表明城市热岛环流的产生是由于城乡地表热量平衡存在差异。白天主要是城市感热通量高于郊区 (Hidalgo et al., 2008a); 夜间主要是城市建筑物的热存储效应和人为热的排放 (Lu et al., 1997)。热岛环流的强度和尺度常受热岛强度、大气稳定度、城市规模等因子的影响 (Delage and Taylor, 1970; Vukovich, 1971; 桑建国等, 2000; Hidalgo et al., 2010)。一般情况下热岛环流最强时水平速度约 $5\text{--}7\text{ m s}^{-1}$, 垂直速度约 1 m s^{-1} , 环流水平尺度约城市尺度的两倍, 垂直厚度可达 1500 m (Lemonsu and Masson, 2002; Hidalgo et al., 2008b)。这些研究涉及的地区地形较为平缓, 像重庆这样地形地貌复杂的城市, 其激发出的热岛环流的结构鲜有人进行过高分辨率的数值模拟研究 (孙永等, 2019), 因此值得深入研究。

湍流运动实现了大气和地表的质量、能量、热量的交换 (王成刚等, 2017a), 不同下垫面的大气边界层湍流输送过程需要更进一步的认知。一些观测试验分析表明, 不同下垫面处湍流对动量、水汽、热量的输送不同, 其适用的计算参数也不同 (刘树华等, 2009; 刘鹏飞等, 2010)。Barlow et al. (2015) 分析一次强热岛过程下城市处湍流结构的演变特征发现, 湍流特征受热岛强度影响, 在“城市对流岛”阶段, 湍流结构与经典对流层特征相似, 但会受高

空剪切流的影响。刘阳等 (2017) 基于 2012~2018 年北京 325 米气象塔观测的三层湍流数据, 利用局地相似理论分析了北京城市下垫面湍流传输的垂直分布特征, 研究指出近中性层结下热量的传输系数较动量、 CO_2 和水汽小, 而在不稳定和稳定条件下热量的传输系数最大, 城市下垫面的标量传输具有非相似性, 因此在城市下垫面并不能将热量的传输简单地推广到 CO_2 和水汽。张梦佳等 (2018) 根据风廓线仪观测数据分析边界层湍流统计特征发现, 受中小尺度局地环流影响时, 湍流活动强烈, 当出现谷风时, 南雄夜间湍流活动明显。城市热岛环流是典型的边界层环流之一, 分析其演变过程中的湍流特征, 有利于更加全面地认识城市热岛环流。

城市热岛是城市热岛环流的源, 目前重庆地区的相关研究主要关注城市热岛的结构、强度等特征, 城市热岛环流的研究较少。任启福 (1992) 利用野外观测资料分析了重庆城市热岛的垂直结构和演变特征。观测显示重庆市城市热岛出现高度集中在 100~300 m, 当风速超过 5 m s^{-1} 热岛现象消失。夜晚热岛强度强于白天, 最强可达 2.2°C 。此次野外观测观测到了热岛环流, 城乡温差约 1.8°C , 热岛环流造成次日清晨城市大雾。李子华等 (1993) 分析同样的观测资料指出, 重庆冬季夜晚地面风场受山风、热岛环流、江陆风的共同影响, 通过数值模拟发现这些气流在城市汇合, 辐合上升, 上升高度可达 300 m 左右。考虑到重庆地形复杂, 但尚铭等 (2009) 利用卫星遥感数据, 分析重庆海拔 300 m 高度的位温, 研究了重庆城市热岛的水平分布和季节变化特征, 并指出重庆城市热岛在夏、秋季的平均强度较成都小。何泽能等 (2017) 分析 56 年的逐时气温资料, 发现重庆城市热岛呈逐年增强趋势。此外, 有学者分析影响城市热岛的因子指出 (Lu et al., 2012; Liu and Li, 2018), 城市扩张和城市人

口密度的增大均会增强城市热岛的范围和强度。[Liu et al. \(2018\)](#) 利用 WRF 模式模拟指出在城市化背景下, 至 2030 年成都重庆城市热岛将增加 1.5°C 。[孙永等 \(2019\)](#) 利用 WRF 模式对重庆市一次夏季高温过程进行数值模拟指出, 复杂地形下的局地环流影响重庆城市热岛分布和强度, 造成高温天气。

城市热岛环流常造成高影响天气。比如, 使污染物在城市聚集 ([王珊等, 2015](#); [朱焱等, 2016](#); [Wang et al., 2017](#)), 触发或加强城市降水 ([Han and Baik, 2008](#); [徐蓉等, 2013](#); [Han et al., 2014](#)), 与城市群间热岛环流相互作用导致局地 and 下游城市高温热浪 ([张璐等, 2011](#))。像重庆这样的山地城市, 城市建筑密度大 ([王咏薇等, 2013](#); [伍见军等, 2013](#)), 城市热岛强, 城市热岛环流在一定程度上增加了重庆高温热浪出现的频次 ([何泽能等, 2013](#); [孙永等, 2019](#))。此外, 重庆特殊的地貌会扩大气象灾害影响, 如重庆城区处在嘉陵江与长江的交汇处, 常常成为受洪灾影响的严重区域 ([Sun and Fang, 2013](#))。因此, 对重庆城市热岛环流结构的认识在一定程度上有利于对重庆气象灾害的防御, 提高城市居民生活舒适度。

本文拟利用高分辨率的数值模式 WRF (V3.9), 挑选典型的城市热岛环流个例进行模拟, 以揭示重庆城市热岛环流的结构和演变特征。此外, 通过对边界层内湍流特征时空分布的认识, 加强对城市热岛环流的认识。这些不仅有利于清楚地认识复杂地

形地区的城市边界层结构特征, 而且能为改善模式对局地环流的模拟能力提供依据。研究结果可应用于城市规划、大气污染物的扩散等研究中 ([王卫国等, 1997](#); [何泽能等, 2010](#))。

2 资料与研究个例

本文采用的资料主要有: 逐小时的重庆市地面常规气象站 (4 个站) 观测资料, 包括温、压、湿、风等气象要素, 逐 12 h 的沙坪坝站探空资料, 香港科技大学环境学院网站提供的逐小时的卫星云图资料, NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 提供的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 逐 6 h 的 FNL 全球分析资料。

研究个例为 2016 年 8 月 17~18 日发生在重庆的一次典型热岛环流。从红外云图上看, 17 日 08:00 (北京时, 下同) 整个重庆地区无云系影响 ([图 1a](#))。500 hPa 天气形势图 ([图 1b](#)) 显示, 重庆周围受高压控制, 等压线稀疏, 背景风场弱, 天气形势稳定。沙坪坝探空数据显示, 500 hPa 以下风速低于 8 m s^{-1} (图略), 这也说明该天大尺度背景风场较弱, 这些气象条件有利于局地环流特征表现明显, 可以将气象站测得的风场体现出的环流特征近似认为是热岛环流 ([White et al., 1999](#); [贾春晖, 2019](#))。重庆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, 平均总云量低于 3 成, 这些条件有利于形成强城市热岛 ([任启福, 1992](#))。

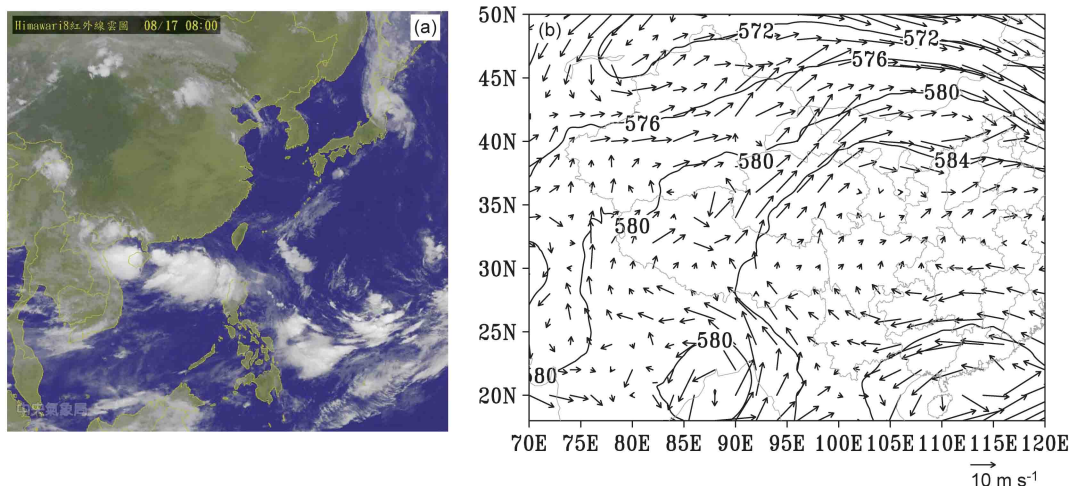


图 1 2016 年 8 月 17 日 08:00 (北京时, 下同) (a) 葵花 8 号卫星红外云图, (b) NCEP FNL $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 分析资料 500 hPa 风场 (矢量, 单位: m s^{-1})、位势高度场 (等值线, 单位: dagpm) 分布

Fig. 1 (a) Infrared cloud image obtained by the Himawari-8 satellite, (b) wind field (vectors, units: m s^{-1}) and geopotential height field (contours, units: dagpm) at 500 hPa from NCEP FNL $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ analysis data at 0800 BT (Beijing time) 17 August, 2016

地面自动站 2 m 温度数据表明, 重庆市主城区当天热岛现象明显, 且夜间热岛强度强于白天; 10 m 风向、风速数据表明, 16:00 开始沙坪坝站以东的测站风速开始减小, 部分站点风向有较大偏转, 至 17:00, 风向均转为向城市辐合, 18:00 辐合强度较强 (图 2), 次日 04:00 风向转变为由城市向南北两侧辐散且持续时间超过四小时, 说明 17:00 至次日 04:00 重庆出现了较为明显的地面乡村风。

3 模式结构和模拟方案

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 8 月 16 日 08:00, 积分 72 h, 前 24 h 为模式“起转”(spin up) 时间, 之后 48 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 FNL 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 (D1)、9 km (D2)、3 km (D3) 和 1 km (D4), 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。

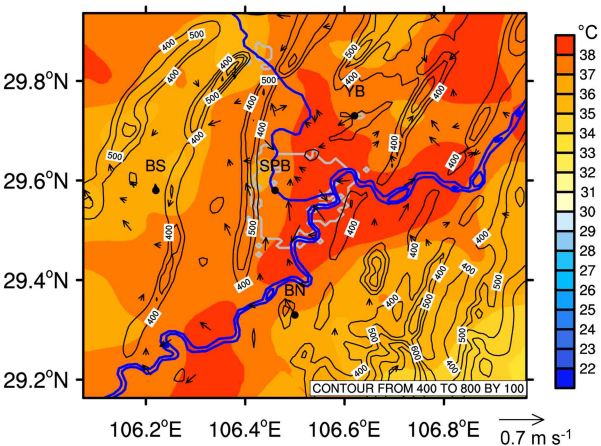


图 2 2016 年 8 月 17 日 18:00 重庆市自动站观测的 2 m 高度温度 (阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、10 m 高度风场 (矢量, 单位: m s^{-1})。图中灰色线条圈出的区域为城市区, 黑色线条表示地形高度, 蓝色线条表示长江和嘉陵江; 字母组合表示基本观测站站名, BS: 璧山, YB: 渝北, SPB: 沙坪坝, BN: 巴南, 下同

Fig. 2 2 m-height temperature (shaded, units: $^{\circ}\text{C}$) and 10 m-height wind field (vectors, units: m s^{-1}) observed at Chongqing automatic stations at 1800 BT 17 August, 2016. The area surrounded by gray lines indicates the urban area, black lines indicate terrain height, and blue lines indicate the Yangtze and Jialing Rivers. The initials denote the names of the basic observation stations, BS: Bishan, YB: Yubei, SPB: Shapingba, and BN: Banan, the same below

考虑重庆地形的特殊性 (Ma et al., 2017), 并依据苏涛等 (2017), 王莹和苗峻峰 (2019), 杨秋彦等 (2019) 的工作, 模式选用的物理过程参数化方案如表 1 所示, 其中 BouLac (Bougeault-Lacarrère) 边界层方案是一种局地的 TKE 闭合方案, 该方案与 MYJ 方案相似, 能够预报湍流动能。但在计算气象要素场垂直扩散率时, 所采用的混合长度等经验常数的定义与 MYJ 方案有所不同 (王成刚等, 2017b; 杨秋彦等, 2019)。研究表明 BouLac 方案所采用的经验常数更适用于复杂地形地区, 对于陡峭地形的晴空湍流强度和位置预报较好 (Bougeault and Lacarrère, 1989)。UCM 城市冠层方案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)。本次模拟将人为热设置为 50 W m^{-2} , 以便较合理地模拟出城市热岛。模式采用的地形数据和土地利用数据分别为 TOPO_GMTED2010_30s 和 MODIS_30s 数据, 该数据库能较好地反映重庆市的地形和土地利用类型特征。D4 区域地形以东北西南走向的丘陵为主, 分布在城市两侧 (图 3b), 城市边界层可能会受山谷风的影响, 选用 BouLac 边界层方案能更好地模拟出复杂地形地区的边界层结构特征。重庆城市的東西向和南北向宽度相当 (图 3c), 约 18 km 左右, 与成都相比规模略小。市中心靠近嘉陵江与长江的汇合处, 城市边界层亦可能受到江陆风的影响。

4 结果分析

4.1 模拟结果的验证

为了定量验证模拟结果的可靠性, 本文计算了

表 1 模式主要物理参数化方案的设置

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)
城市冠层	UCM(Chen et al., 2011)
边界层	BouLac(Bougeault and Lacarrère, 1989)
陆面过程	Noah(Chen and Dudhia, 2001)

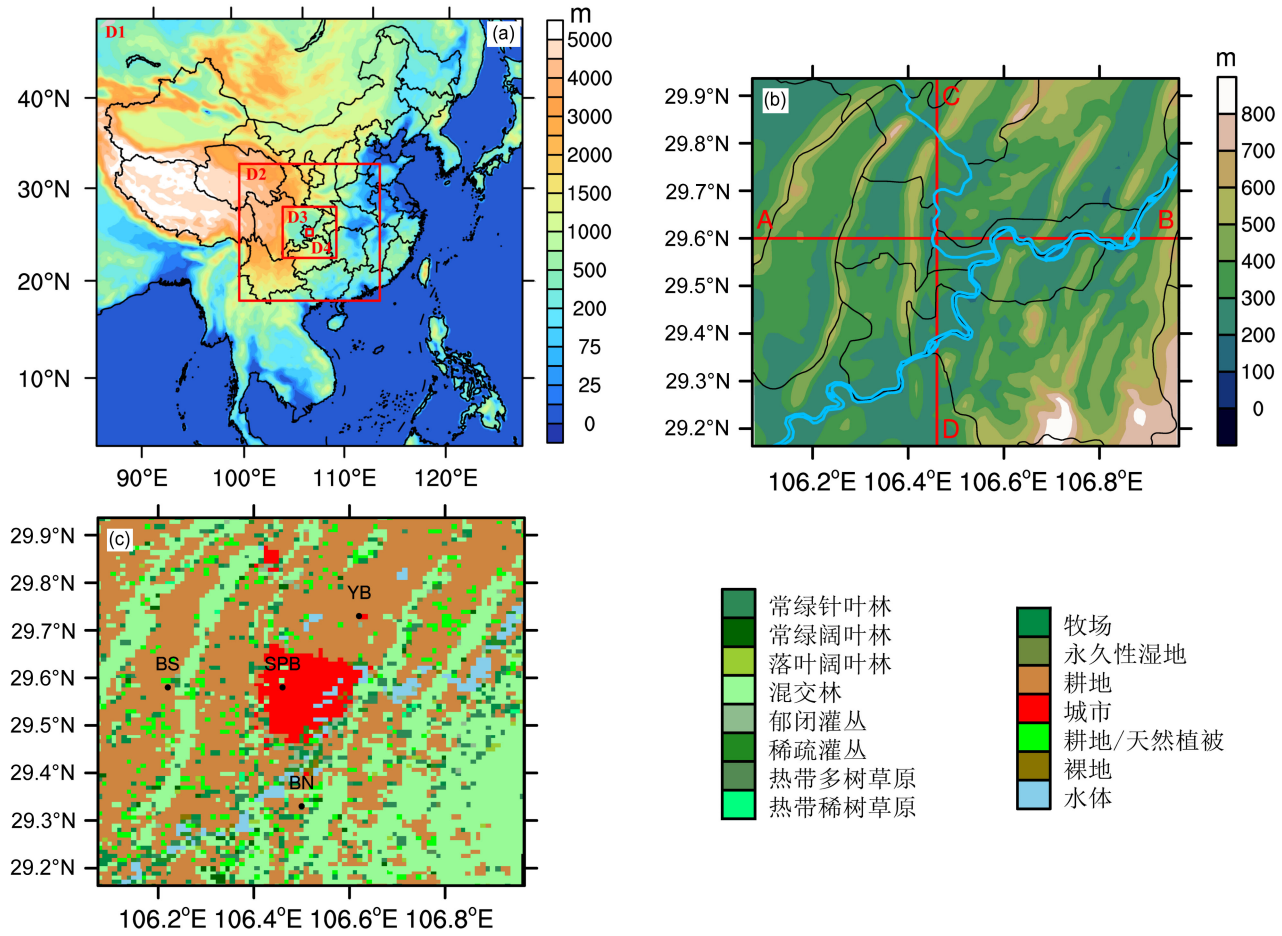


图3 模拟区域示意图：(a) 模拟的四重嵌套区域和地形分布（单位：m）；(b) D4区域的地形分布（单位：m，图中蓝色线条表示长江和嘉陵江，AB线表示过29.6°N，CD线表示过106.37°E）；(c) D4区域的土地利用类型分布

Fig. 3 Model domains: (a) Coverage and terrain height (shaded, units: m) of model domains 1, 2, 3, and 4 (denoted by D1, D2, D3, and D4, respectively); (b) terrain height in D4 (shaded, units: m, blue lines indicate the Yangtze River and Jialing River, line AB represents 29.6°N and line CD 106.37°E); (c) land use categories in D4

一些统计指标 (Pielke Sr, 2002; Miao et al., 2008), 如观测变量方差 (σ_{obs})、模拟变量方差 (σ_{sim})、平均偏差 (MB)、均方根误差 (RMSE) 和去除平均偏差的均方根误差 (RMSE_{UB})、模拟和观测的相关系数 (r)。计算公式如下:

$$\sigma_{\text{obs}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{obs}_i - \overline{\text{obs}})^2}{N}}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{sim}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{sim}_i - \overline{\text{sim}})^2}{N}}, \quad (2)$$

$$\text{MB} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{sim}_i - \text{obs}_i), \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{sim}_i - \text{obs}_i)^2}{N}}, \quad (4)$$

$$\text{RMSE}_{\text{UB}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(\text{sim}_i - \overline{\text{sim}}) - (\text{obs}_i - \overline{\text{obs}})]^2}{N}}, \quad (5)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(\text{sim}_i - \overline{\text{sim}})(\text{obs}_i - \overline{\text{obs}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\text{sim}_i - \overline{\text{sim}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\text{obs}_i - \overline{\text{obs}})^2}}, \quad (6)$$

其中, sim 和 obs 分别表示模拟和观测的气象要素值, N 为样本数。

Pielke Sr (2002) 指出, 当满足以下标准时: $\sigma_{\text{sim}} \approx \sigma_{\text{obs}}$ 、 $\text{RMSE} < \sigma_{\text{obs}}$ 和 $\text{RMSE}_{\text{UB}} < \sigma_{\text{obs}}$, 模拟是可靠的。参考 Pielke Sr (2002) 的标准, 模式的模拟

结果是可靠的。同时本文利用逐时的地面观测资料、沙坪坝站的探空资料与模拟结果进行对比。分析 D4 区域涉及的 4 个基本观测站 (表 2) 模拟与观测的 2 m 温度、10 m 风场 (图 4) 及其统计变量 (表 3 和表 4) 可见, 模式可以模拟出 2 m 温度的日变化特征, 两者的相关性很好, 模拟值较观测值略小, 平均均方根误差在 1.8 °C 以内, 对沙坪坝站和巴南站模拟效果最好。模式对 10 m 风场的模拟有一定偏差, 风速的平均均方根误差在 1.5 m s⁻¹ 左右, 风向的平均均方根误差在 70°左右 (Li et al., 2014)。分析模拟与观测的 10 m 风场的演变特征可见, 城市西侧的璧山站 17 日 15:00 开始吹偏东风或较弱的偏西风, 说明乡村风开始出现, 这一现象持续到 18 日 00:00, 模式成功模拟出风速变小, 风向改变的特征。位于城市东北方向的渝北站, 15:00 开始风向由东南风转为东北风, 并持续至次日 08:00 (个别时次除外), 模式较好地模拟出了风向的转变。位于城市南侧的巴南站, 风场上未出现转变, 这可能是因为该天重庆受系统性的南风影响, 模拟与观测相比有一定误差。造成误差的可能原因是, 一方面巴南站的模式地形高度比巴南观测站的地形高度低 200 m, 由于近地面湍流的随机性较大, 造成风速差异较大 (Wang et al., 2013); 另一方面巴南站的模式土地利用类型为常绿针叶林, 粗糙度较大, 但实际中该观测站点的附近为草坪,

且周边开阔平坦、通风性较好, 这会造成模拟的风速较实际偏小。此外, 观测显示 18:00 地面乡村风较强 (图 2), 温度由城市向两侧递减, 城市西北侧温度高于城市东南侧温度。模拟结果显示 (图 6c 和图 8c), 风向在沙坪坝西侧辐合, 城市热岛分布呈三角状, D4 区域东南角温度较低。对比观测和模拟的结果可见, 模式可以较合理地模拟出乡村风和城市热岛的特征。

总体来看, 模拟结果与观测存在一定差异, 但可以反映出乡村风和城市热岛的基本特征, 有助于揭示城市热岛环流的结构和演变, 存在的误差主要由模式地形、土地利用类型与实际地形、土地利用类型存在的差异引起, 在可接受范围之内。

4.2 重庆市城市热岛特征

本文根据 D4 区域中城市点与非城市点平均 2 m 温度的差值确定城市热岛强度 (黄利萍等, 2012)。图 5 为重庆城市热岛强度随时间的演变特征图, 由图可见热岛强度具有日变化特征。17 日 09:00 开始热岛强度随时间减弱, 这是由于城市建筑材料具有较强的储热能力, 此时城市区域的净辐射主要用于热量存储 (Ek et al., 2003), 因此热岛强度不增反降 (Hidalgo et al., 2008a)。12:00 之后

表 2 地面气象观测站站点信息

Table 2 Information of the surface meteorological observation station

站名	站号	纬度	经度	海拔高度/m
沙坪坝	57516	29.58°N	106.46°E	259
渝北	57513	29.73°N	106.62°E	465
璧山	57514	29.58°N	106.22°E	332
巴南	57518	29.33°N	106.50°E	506

表 3 关于 2016 年 8 月 17 日 08:00 (北京时, 下同) 至 8 月 19 日 08:00 模拟和观测的 2 m 气温的一些统计变量

Table 3 Statistics for simulated and observed 2 m-height temperatures from 0800 BT 17 August to 0800 BT 19 August, 2016

站名	2 m 气温/°C					
	σ_{obs}	σ_{sim}	MB	RMSE	RMSE _{UR}	r
沙坪坝	3.37	2.56	-0.54	1.13	1.02	0.98
璧山	3.52	2.86	-1.92	2.20	1.07	0.96
渝北	3.07	2.63	-2.28	2.40	0.76	0.98
巴南	2.99	2.7	-0.81	1.43	1.20	0.92

表 4 关于 2016 年 8 月 17 日 08:00 至 8 月 19 日 08:00 模拟和观测的 10 m 风速、风向的一些统计变量

Table 4 Statistics for simulated and observed 10 m-height wind speeds and wind directions from 0800 BT 17 August to 0800 BT 19 August, 2016

站名	10 m 风速/m s ⁻¹						10 m 风向					
	σ_{obs}	σ_{sim}	MB	RMSE	RMSE _{UR}	r	σ_{obs}	σ_{sim}	MB	RMSE	RMSE _{UR}	r
沙坪坝	0.75	0.82	1.14	1.54	1.04	0.12	110.6°	116.43°	-58.5°	81.83°	130.96°	0.32°
璧山	1.45	1	-0.23	1.41	1.4	0.38	118.68°	79.43°	-41.33°	87.48°	128.17°	0.2°
渝北	1.33	0.82	-0.37	1.36	1.31	0.32	44.73°	35.61°	-11.16°	53.11°	51.93°	0.16°
巴南	1.37	0.76	-1.41	2.04	1.48	0.1	70.36°	82.48°	18.98°	74.97°	88.33°	0.33°

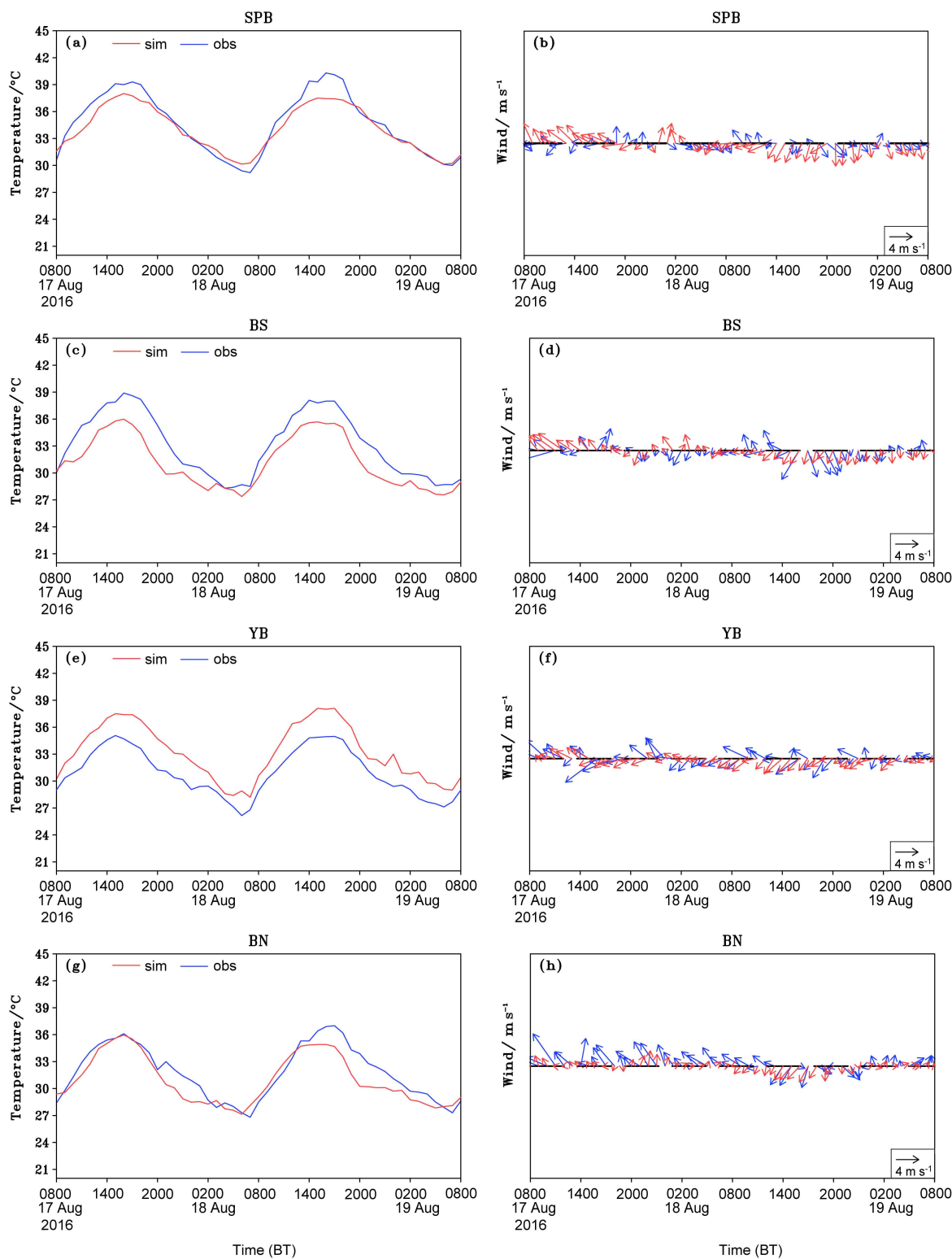


图4 2016年8月17日08:00至19日08:00重庆市4个气象站观测(obs)与模拟(sim)的2 m温度(左列, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、10 m风场(右列, 单位: m s^{-1})对比: (a, b) 沙坪坝 (SPB); (c, d) 璧山 (BS); (e, f) 渝北 (YB); (g, h) 巴南 (BN)。蓝色表示观测, 红色表示模拟

Fig. 4 Observed and simulated 2-m temperature (left column, units: $^{\circ}\text{C}$) and 10-m wind (right column, units: m s^{-1}) at four weather stations in Chongqing from 0800 BT 17 August to 0800 BT 19 August, 2016: (a, b) Shapingba (SPB), (c, d) Bishan (BS), (e, f) Yubei (YB), and (g, h) Banan (BN). Blue is for observation, red for simulation

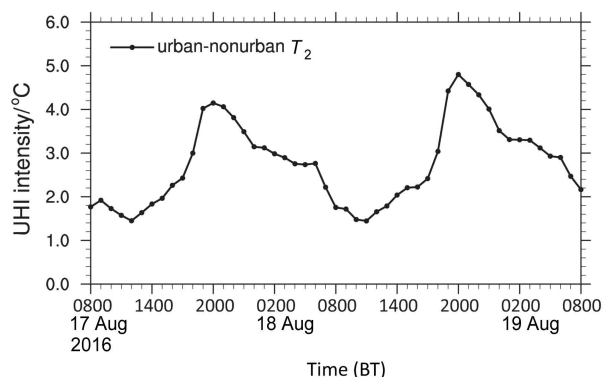


图5 2016年8月17日08:00至19日08:00 D4区域城市热岛(UHI)强度($T_{2\text{ urban}} - T_{2\text{ nonurban}}$, $T_{2\text{ urban}}$ 为城市平均2 m温度, $T_{2\text{ nonurban}}$ 为非城市平均2 m温度, 单位: °C)随时间的变化

Fig. 5 Diurnal variation of urban heat island (UHI) intensity ($T_{2\text{ urban}} - T_{2\text{ nonurban}}$, $T_{2\text{ urban}}$ is averaged 2-m temperature of urban areas, $T_{2\text{ nonurban}}$ is averaged 2-m temperature of nonurban areas, units: °C) in D4 from 0800 BT 17 August to 0800 BT 19 August, 2016

随着城乡感热差异的增大, 热岛不断增强。17:00开始存储在下垫面中的土壤热通量开始释放, 且此时湍流开始减弱, 热岛强度增加速率加快 (Li et al., 2014), 至20:00热岛强度达4.1°C, 之后随着城乡土壤热通量差异减小, 热岛强度逐渐减弱。18日08:00至19日08:00热岛强度演变规律与前24 h相似, 但在强度上存在差异。

4.3 水平环流结构

受地形和嘉陵江、长江的影响, 重庆城市风场结构复杂。17日08:00, 重庆市城市热岛强度较弱, 约1~2°C (图6a); 范围也较小, 仅在沙坪坝站周围, 且分布不对称。丘陵温度低于周围山谷地区1~2°C, 丘陵越高温差越大。从重庆市10 m风场分布可见 (图7a), 近地面风场以东南风为主, 城市西侧长条状丘陵较多, 地形狭管效应使城市以西风速大于城市以东风速。此外, 条状丘陵西侧风速大于东侧。散度场上可以看出, 丘陵顶部以辐散为主, 山谷处以辐合为主; 城市区域无明显的辐合辐散。这说明此时重庆市受较强的山风影响 (田越等, 2020), 条状丘陵激发出的山风与偏东背景风叠加, 最终出现丘陵西侧风速增加, 东侧风速降低, 西侧风速大于东侧风速的特征。由于重庆地形以细长条状丘陵为主, 且高度低, 激发的山风风速和规模均较小 (傅抱璞, 1980), 丘陵东侧山风不足以抵抗背景风, 此时重庆市风场呈现以东南风为主, 丘陵西侧风速大于东侧风速的分布特征。之后随着

太阳辐射的增强, 气温开始增加, 但由于下垫面性质以及地形的差异, 不同地区温度增加不同。

至15:00, 城市热岛强度与08:00相比差别不大, 山坡与山谷处温差有所削减 (图6b)。从10 m风场分布可见 (图6b), 重庆市风向仍以东南风为主, 其中城市西侧区域, 条状丘陵的西侧风速减小, 丘陵东侧风速增加, 说明叠加在背景风上的山风消失, 甚至可能出现微弱的谷风; 城市东侧区域风速增加, 北部出现东北风, 这可能是由于城市热岛激发出的乡村风开始出现或北部丘陵周围的气流爬坡所致。散度场特征表明, 丘陵处的辐散开始消失, 部分区域出现辐合。这一迹象也表明可能存在丘陵与周围平原激发的谷风。与此同时沙坪坝站周围开始出现辐合, 标志着部分区域出现乡村风。随着净辐射通量的减弱, 近地层温度增加缓慢, 甚至开始降低。由于城市冠层白天存储了大量的土壤热通量, 而郊区的热存储较少, 导致城市降温速率小于郊区, 城市热岛进一步增强。

至18:00, 城市热岛强度可达3°C, 随着条状丘陵温度的降低, 城市以北区域山体与山谷的温差开始增大 (图6c)。同时部分江面温度高于两岸可达1°C, 这可能是因为河水的热容量较大, 江面附近降温慢。结合风场和散度场分布特征 (图7c), 此时城市区域出现乡村风, 在偏东背景风和谷风的影响下, 近地面风场在(29.60°N, 106.37°E)发生碰撞, 城市区域出现多条辐合线。除沙坪坝西侧丘陵处仍存在风场的辐合外, 条状丘陵处的辐合开始消失, 部分山体北段出现较弱辐散, 这标志着丘陵处谷风开始向山风转换。此外, 长江东段多个区域出现辐合, 这可能是由于出现了陆风。随着城市边界层稳定度的增加, 尽管在18:00~20:00城市热岛强度增强, 但乡村风强度开始减弱。

至次日02:00, 城市热岛强度减弱, 范围缩小 (图6d), 加上城市稳定度增强, 乡村风风速减小, 辐合大大减弱, 仅沙坪坝北侧存在微弱的辐合 (图7d)。随着山顶和山谷温差增加, 山风增强, 丘陵西侧风速大于丘陵东侧, 且多处山体处出现风向向两侧山谷辐散, 辐散的山风在山谷处碰撞。长江和嘉陵江处陆风规模增大。

模式层第二层垂直速度分布特征显示, 08:00 (图8a) 重庆市低层以下沉运动为主, 且集中分布在丘陵西侧, 这从另一个角度说明了丘陵处有山风存在。15:00 (图8b) 下沉运动减弱, 山脉东侧

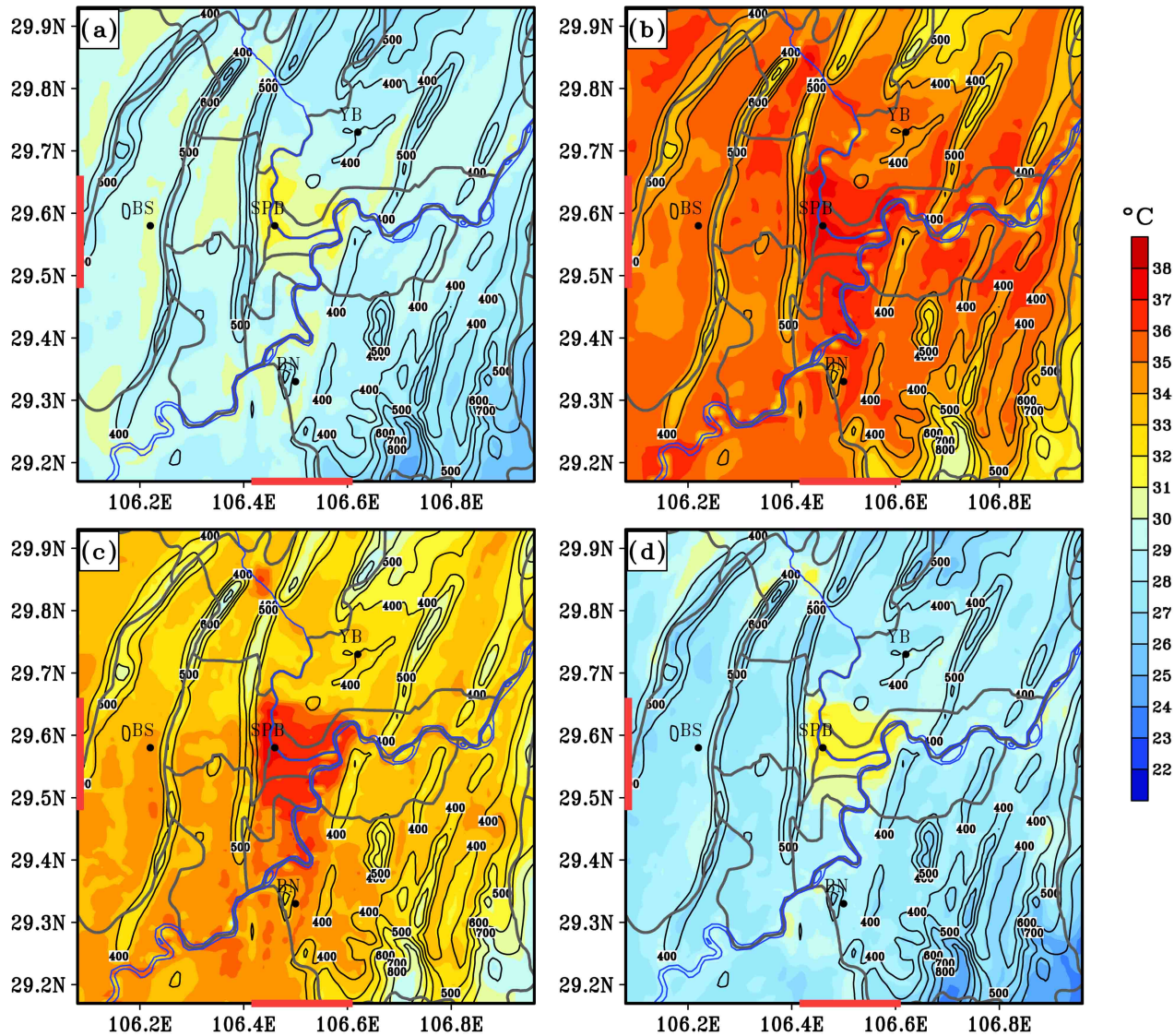


图6 2016年8月(a)17日08:00、(b)17日15:00、(c)17日18:00和(d)18日02:00模拟的2 m温度场的水平分布(阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$)。等值线为地形高度(单位: m), 坐标轴上的红色线条表示城市

Fig. 6 Distribution of simulated 2-m temperature (shaded, units: $^{\circ}\text{C}$) at (a) 0800 BT, (b) 1500 BT, (c) 1800 BT 17 August, and (d) 0200 BT 18 August, 2016. Terrain height shown in contours (units: m), the red bars on the axis represent the urban area

上升运动大大增强, 说明此时谷风开始出现。18:00 (图 8c) 山体处上升运动的强度和规模大大减弱, 这说明此时谷风开始向山风转换, 受城市热岛环流的影响沙坪坝西侧依旧保持较强的上升运动。至次日 02:00 (图 7d) 山体处再次呈现以下沉运动为主的特征, 说明重庆市受山风影响。垂直运动表现的特征和水平风场的特征相一致。

由以上分析可知, 乡村风主要出现在 15:00 至次日 02:00。谷风出现在午后 15:00~18:00、18:00~02:00 为谷风向山风转换的过渡期, 山风主要出现在 02:00 以后至次日清晨。长江和嘉陵江激发出的

陆风主要出现在凌晨, 在 02:00 前后规模较大。重庆市地面乡村风受沙坪坝西侧谷风的影响, 谷风改变了乡村风的辐合位置, 乡村风推迟了离城市较近的丘陵东侧谷风向山风转变的时间。

4.4 垂直环流结构

为了清晰地展示城市热岛环流的垂直结构和演变特征, 过 (29.60°N , 106.46°E) 作纬向和经向风场的垂直剖面。考虑到水平速度与垂直速度相比量级较小, 在合成风矢量时将垂直风速扩大 5 倍。重庆丘陵呈细长条状分布, 东西向地形起伏较大, 丘陵高度在 0.3 km 以内; 南北向地形起伏平缓,

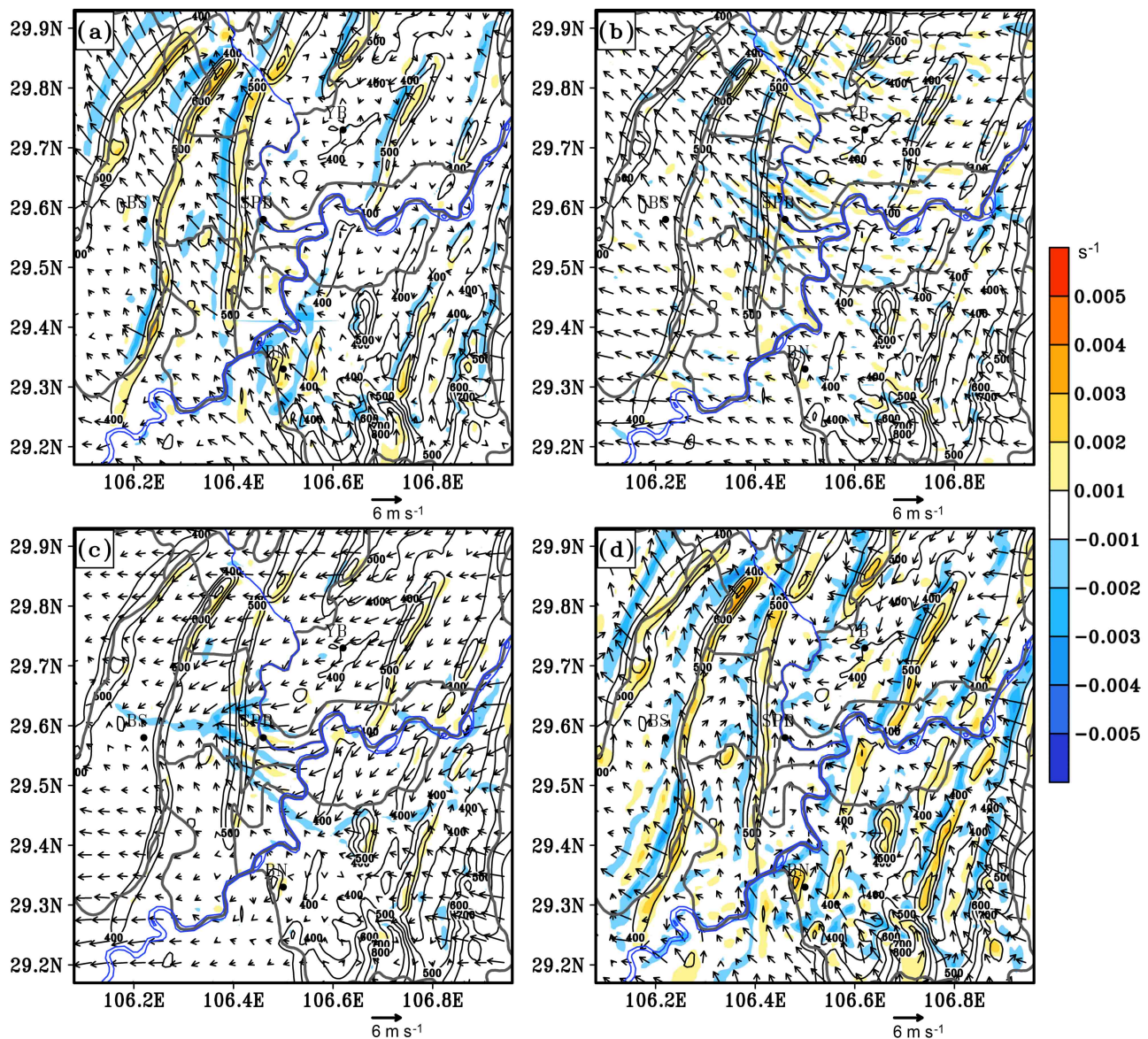


图7 同图6, 但为10 m风场(矢量, 单位: m s^{-1})和散度场(填色, 单位: s^{-1})

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for 10-m wind (vectors, units: m s^{-1}) and divergence (shaded, unit: s^{-1})

丘陵高度约在0.2 km以内, 城市地形南高北低。为了方便说明, 本文图9a、b中数字1、2、3、4分别指示丘陵1、丘陵2、丘陵3、丘陵4。

午后, 太阳辐射增强, 下垫面接收到的热量增多, 城乡地表能量平衡差异增大, 城市热岛增强; 与此同时大气斜压性强, 湍流活动强烈, 这些条件有利于城市热岛环流的出现 (Baik et al., 2007)。15:00, 东西向(图9a)主要表现为自西向东传播的波动气流 (肖丹, 2011), 丘陵2的右侧开始出现弱的上坡风, 其部分特征被背景风掩盖。南北向(图9b)重庆市从低层到高层均受偏南风影响。尽管此时近地面风场显示城市西侧风向出现了向东

的偏转, 但由于乡村风较弱, 垂直风场上并未出现环流。

15:00之后城市热岛强度继续增强, 稳定度变化不大, 热岛环流不断增强。至18:00, 地面乡村风在(29.60°N, 106.37°E)处辐合, 此时城市热岛环流达到最强, 环流结构较为清晰。东西向剖面图显示(图9c), 城市东侧有多个明显的环流圈, 其中城市两侧的环流圈主要是城市热岛激发出的热岛环流圈。西侧城市热岛环流圈尺度较小, 约0.1个纬距, 水平风速约3~4 m s^{-1} , 最大上升速度约0.6 m s^{-1} , 受背景风和谷风的影响, 高空未出现回流; 东侧城市热岛环流圈水平尺度约0.15个

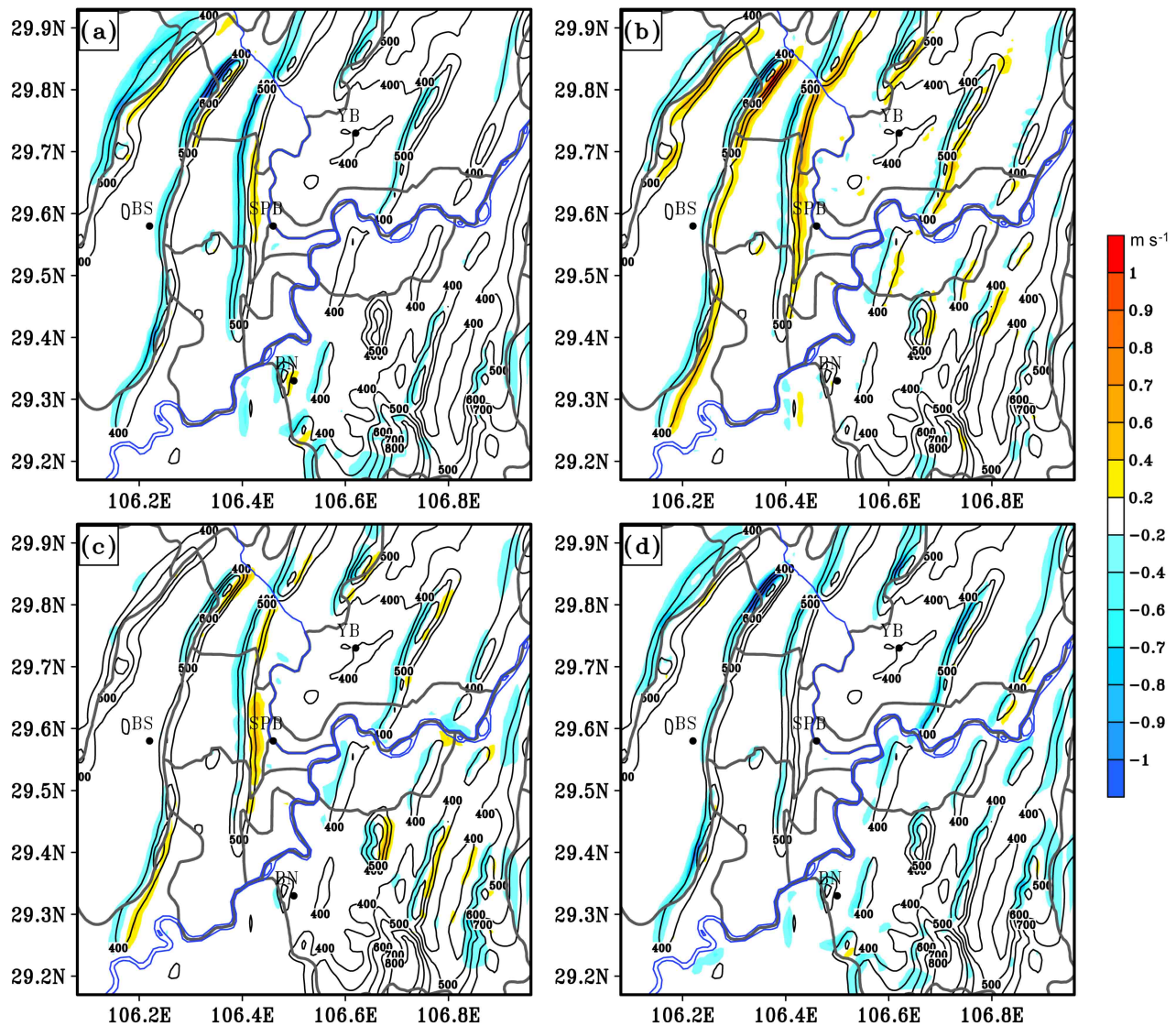


图8 同图6, 但为第二模式层(约20 m AGL)垂直速度(阴影, 单位: m s^{-1})

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for vertical velocity (vectors, units: m s^{-1}) at the second model level (about 20 m above ground level)

纬距, 水平风速约 $2\sim 3 \text{ m s}^{-1}$, 最大上升速度约 0.4 m s^{-1} , 在地面之上 0.5 km 处出现回流, 环流厚度约 1.4 km 。由于地形坡度的存在导致山顶和山谷处产生温差(姜平等, 2019), 部分山体处出现谷风或谷风环流。在丘陵1的西侧, 有较强的上升气流, 最大值可达 0.8 m s^{-1} , 这可能是此时的谷风与背景气流叠加而形成的; 丘陵1的东侧谷风与城市热岛环流反向叠加, 削弱了西支热岛环流的强度和水平尺度。在丘陵2的西侧, 谷风削弱了东支热岛环流下沉支速度和水平尺度; 丘陵2的东侧有一因地形差异激发出来的谷风环流圈, 环流水平尺度和垂直厚度均较小, 水平速度约 $3\sim 4 \text{ m s}^{-1}$, 垂直速度约 0.2 m s^{-1} , 这一环流削弱了热岛环流水平尺度。南

北向剖面图上显示(图9d), 城市南侧热岛环流水平尺度约 0.15 个经距, 水平速度约 $2\sim 3 \text{ m s}^{-1}$, 最大上升速度约 0.4 m s^{-1} , 最大下沉速度约 0.4 m s^{-1} , 可向上伸展约 1.2 km , 由于背景风的存在, 城市南侧的热岛环流并未出现高空回流。环流的下沉支所在点的下垫面类型是水, 水面温度较城市温度低, 故增强了环流的下沉运动, 且增大了环流的水平尺度。丘陵3北侧的地形陡然下降, 可能激发了地形下坡风, 故在城市热岛环流的上升支附近出现了下沉气流, 削弱了环流上升支的强度。城市北侧的热岛环流圈水平尺度约 0.15 个经距, 水平风速约 $2\sim 3 \text{ m s}^{-1}$, 最大上升速度约 0.5 m s^{-1} , 在地面之上 0.4 km 处出现回流, 环流厚度约 1.3 km 。丘陵4南

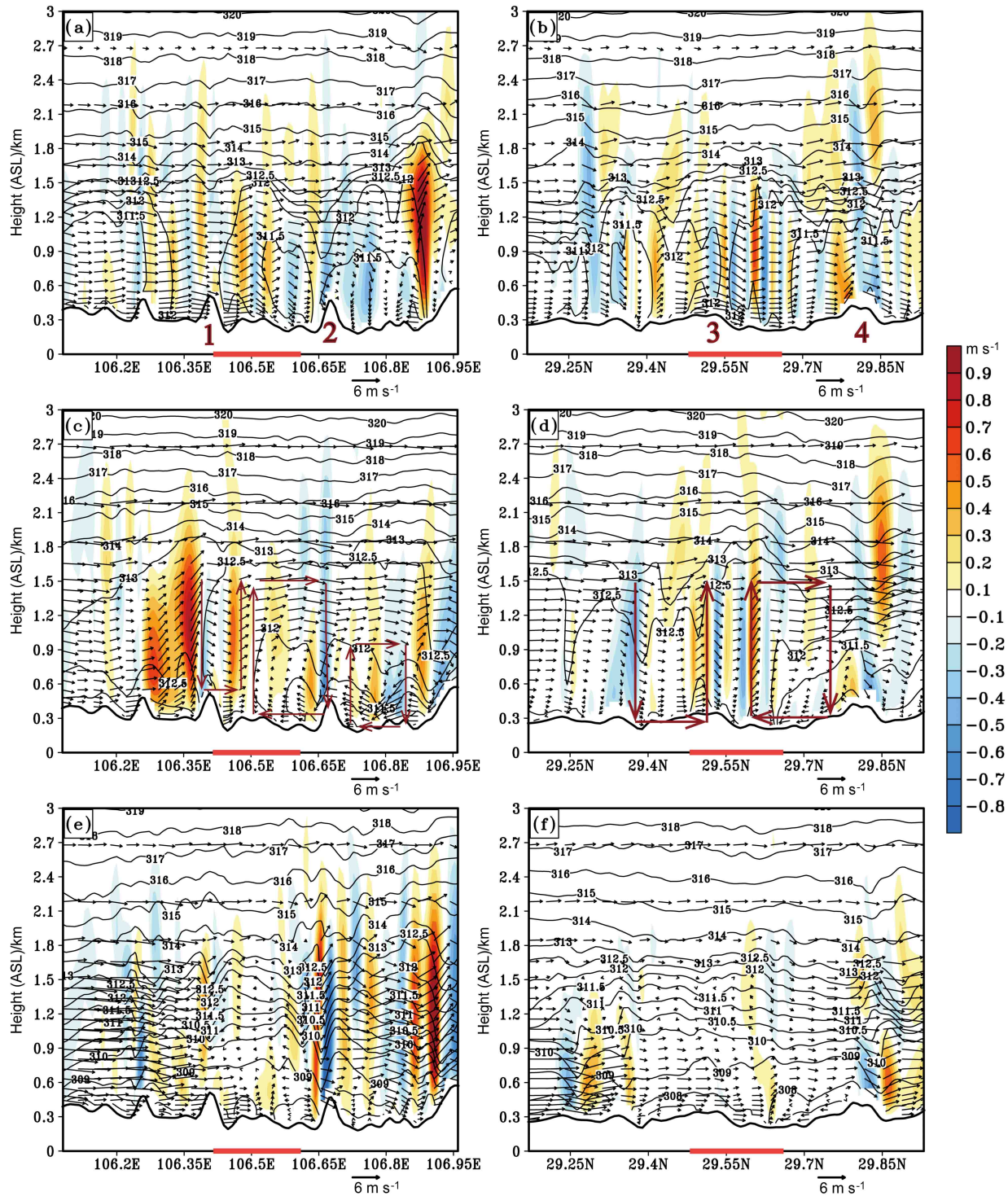


图9 2016年8月(a, b) 17日15:00、(c, d) 18:00、(e, f) 18日02:00沿图3b中AB线(左列)、CD线(右列)的垂直速度 w (阴影, 单位: m s^{-1})、风场(矢量, 单位: m s^{-1} , 其中左列为 $(u, w \times 5)$, 右列为 $(v, w \times 5)$, u 为纬向风速, v 为经向风速), 和位温(等值线, 单位: K)的垂直剖面。横坐标上的红色线条表示城市, 9a、b中的数字1、2、3、4依次指示丘陵1、丘陵2、丘陵3、丘陵4, 黑色粗实线表示地形高度, 下同

Fig. 9 Vertical cross sections of vertical velocity (w , shaded, units: m s^{-1}), wind field (vectors, units: m s^{-1} , left column is $(u, w \times 5)$, right column is $(v, w \times 5)$, u is U speed, v is V speed), and potential temperature (contours, units: K) along line AB (left column), line CD (right column) in Fig. 3b at (a, b) 1500 BT 17, (c, d) 1800 BT 17 August, and (e, f) 0200 BT 18 August, 2016. The red bar on the horizontal axis represents the urban area, numbers 1, 2, 3, 4 in 9a, b indicate hill 1, hill 2, hill 3, and hill 4, the black thick solid line indicates terrain height, the same below

侧的上坡风与城市热岛环流反向叠加, 削弱了城市西侧的热岛环流。

20:00 以后城市热岛开始减弱, 随着热岛的减弱和大气稳定度的增强, 热岛环流逐渐减弱, 环流的三维结构被破坏。至次日 02:00, 东西向剖面显示 (图 9e), 仅 0.4 km (AGL) 以内还存在微弱的辐合, 辐合层厚度不到 0.3 km, 上升速度不超过 0.2 m s^{-1} 。丘陵 2 的西侧出现山风环流, 水平风速约 1 m s^{-1} , 最大下沉速度约 0.4 m s^{-1} , 环流的水平和垂直尺度均较小; 丘陵 2 东侧的谷风环流几乎消失。南北方向上 (图 9f), 热岛环流几乎消失, 丘陵 3 的南侧出现山风环流, 受背景风影响削弱, 环流厚度不足 0.2 km, 环流的水平和垂直速度均较小。丘陵 4 的南侧仍存在一个尺度较小的环流圈, 水平尺度约 0.1 个纬距, 垂直厚度不超过 0.3 km, 最大上升速度约 0.2 m s^{-1} 。由于此时丘陵 4 的两侧盛行山风, 因此这一环流圈可能是由山脉西侧的山风和北支热岛环流叠加而成的。

以上分析表明, 重庆城市热岛环流在最强时水平速度约 $3 \sim 4 \text{ m s}^{-1}$, 垂直速度约 0.5 m s^{-1} , 受谷风影响环流在东西和南北方向呈现明显的不对称结构 (Ganbat et al., 2015a), 环流水平尺度不超过城市规模的两倍, 垂直厚度约 1.3 km。与成都城市热岛环流相比, 重庆市城市热岛环流的水平尺度和垂直厚度较小, 环流的垂直速度较弱, 可能原因是重庆城市规模较成都小, 受“两江四山夹三槽”的特殊地形影响 (Luo and Li, 2014; 李军等, 2018), 热岛范围和强度较成都小 (李晓敏和曾胜兰, 2015), 同时谷风与热岛环流的反向叠加削弱了热岛环流强度 (Ganbat et al., 2015b)。

4.5 湍流特征

边界层内物理量的垂直梯度大, 湍流运动实现了边界层内动量、热量、水汽的再分布, 影响天气系统的发生发展 (杜云松等, 2011)。以往热岛环流期间能量分析局限于对地表热通量的分析, 鲜有研究分析期间湍流特征。因此本文分析了热岛环流演变过程中, 大气边界层内湍流动能特征以及湍流对动量、热量、水汽的输送。

4.5.1 湍流动能

湍流动能的大小反映了湍流运动的强弱, 它为中小尺度系统的发展提供能量。15:00 湍流活跃, 且城市区域湍流较非城市区域活跃 (图 10a、b)。东西向剖面图上城市区域湍流动能最大超过 $3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$;

非城市区域湍流动能最大超过 $1.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 。南北向剖面图上城市区域湍流动能最大超过 $3.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$; 非城市区域湍流动能最大超过 $1.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 。湍流交换最强烈的高度集中分布在边界层低层。整个剖面的边界层高度显示, 城市和非城市区域的边界层高度均超过 1.5 km, 城市区域边界层高度高于非城市区域, 且几个边界层高度极小值大致对应着长江或者嘉陵江。

随着太阳辐射减弱, 湍流强度在 16:00 之后开始减弱。至 18:00 (图 10c、d), 东西向剖面图上, 城市区域湍流强度最强不超过 $1.9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, 最大值出现在边界层内; 非城市区域不超过 $1.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, 最大值出现在 0.6 km (AGL) 处。南北向剖面图上, 城市区域湍流强度最强不超过 $2.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, 非城市区域不超过 $0.6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, 最大值出现高度均在边界层高度以下。此时湍流活跃程度总体下降, 非城市区域边界层高度下降明显, 除个别地区以外, 边界层高度降至 0.3 km 以下; 城市区域边界层高度并未随着湍流强度减弱而下降, 相反略有抬升, 平均约抬升至 1.8 km。这可能是因为此时城市热岛环流发展强盛, 热岛环流的上升高度有所升高。

夜间无太阳短波辐射, 地表白天存储的热量以及大气逆辐射为大气提供能量, 由于提供的能量较少, 因此湍流强度减弱, 边界层高度也降低。至次日 02:00 (图 10e 和 f) 城市以外区域边界层高度均小于 0.1 km; 城市边界层高度约在 0.4~0.5 km, 东西向和南北向差异较小。由于城市区域的湍流动能较小, 不能为热岛环流的发展提供能量, 城市热岛环流衰减。

综上所述, 城市区域的湍流动能大于非城市区域, 城市区域的湍流动能为热岛环流发展提供能量。

4.5.2 湍流通量

通量指沿某一方向单位时间, 通过单位面积的某一物理量的大小。大气中垂直方向的湍流通量比水平方向的湍流通量大得多 (Roth and Oke, 1995), 因此下文主要分析垂直方向上湍流通量的分布特征, 包括湍流动量通量 ($\overline{w'u'}$ 、 $\overline{w'v'}$)、湍流热量通量 ($\overline{w'T'}$) 和湍流水汽通量 ($\overline{w'q'}$)。数值模式中通过参数化的方法来表示湍流对动量、热量、水汽的交换, 湍流通量的强度由交换系数和物理量的垂直切变共同决定 (Bougeault and Lacarrère, 1989)。

午后太阳辐射增强, 湍流混合强度和湍流动量

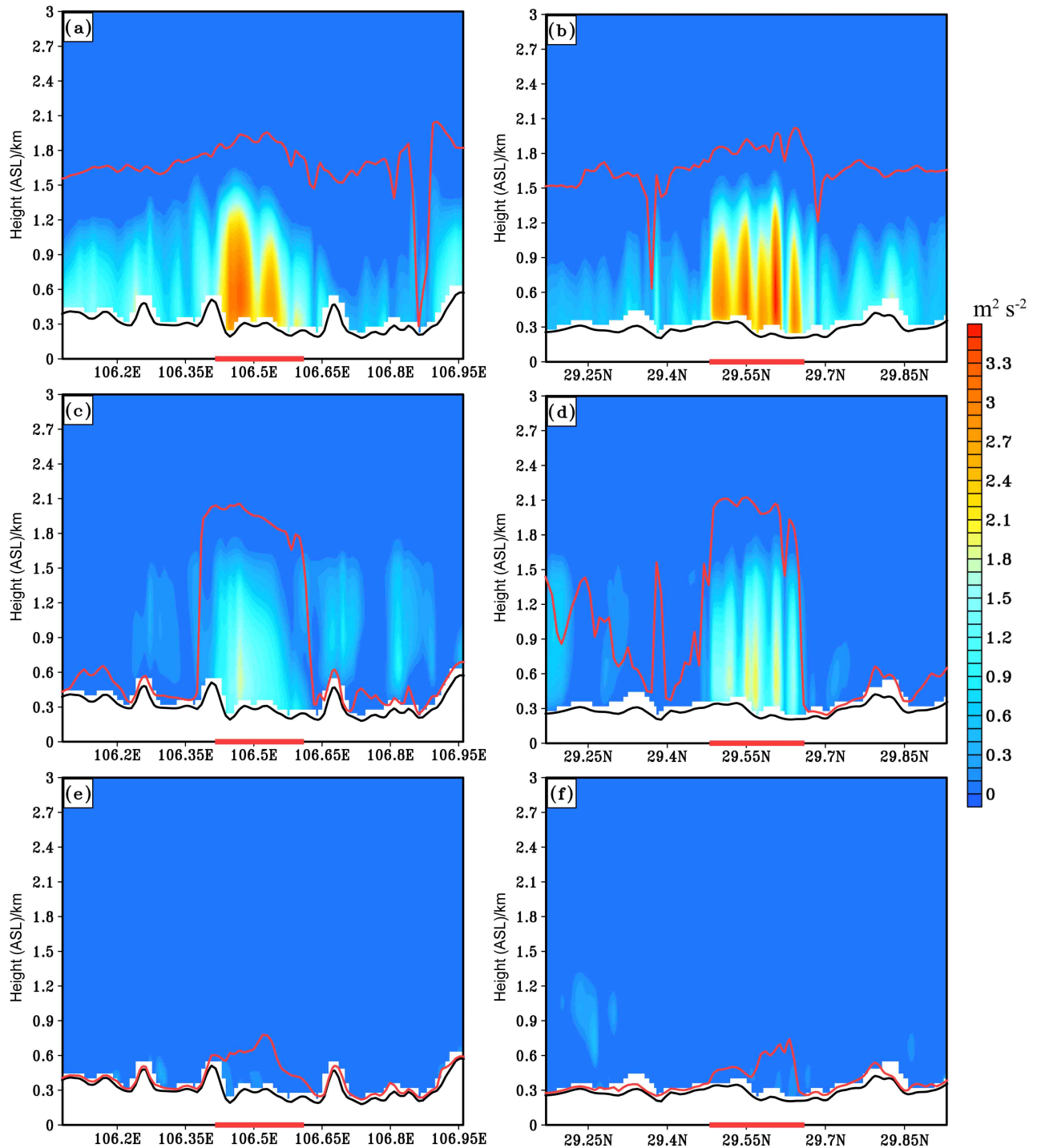


图 10 同图 9, 但为湍流动能 (阴影, 单位: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) 和边界层高度 (线条, 单位: km; Above Sea Level, 简称 ASL)

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for turbulent kinetic energy (shaded, units: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), boundary layer height (lines, units: km, ASL: Above Sea Level)

的垂直梯度均增大, 湍流动量的垂直输送增强, 能够扩散的最大高度升高。15:00 (图 11a、b), 东西向剖面上纬向湍流动量通量 ($\overline{w'u'}$) 分布特征显示, 动量交换集中在 1.5 km (ASL) 以下, 这一高度与边界层高度有较好的对应关系。此时, 边界层

内以西风动量的向上传输为主, 最大强度可达 $0.35 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$, 出现在城市西边界处。伴随着城市热岛环流的出现, 城市上空开始出现西风动量的向下传输, 最大强度可达 $0.15 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$ 。南北方向特征与东西方向特征类似, 但强度有所差异。南北方向西

风动量向上传输的最大强度约 $0.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, 向下传输的最大强度约 $0.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 。之后西风动量向下的传输不断增强, 至 18:00 (图 11c、d), 城市区域以西风动量的下传为主, 最大强度可达 $0.35 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, 城市西侧和南侧边界附近保持着较小的西风动量的

向上传输, 大小约 $0.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, 湍流交换集中在 1.8 km (ASL) 以下。这可能是由于此时热岛环流发展强盛, 西风动量的下传是为了补偿因城市东侧城市热岛环流和城市北侧热岛环流发展而造成的西风动量的耗散。随着热岛环流的减弱, 湍流对动量的输送

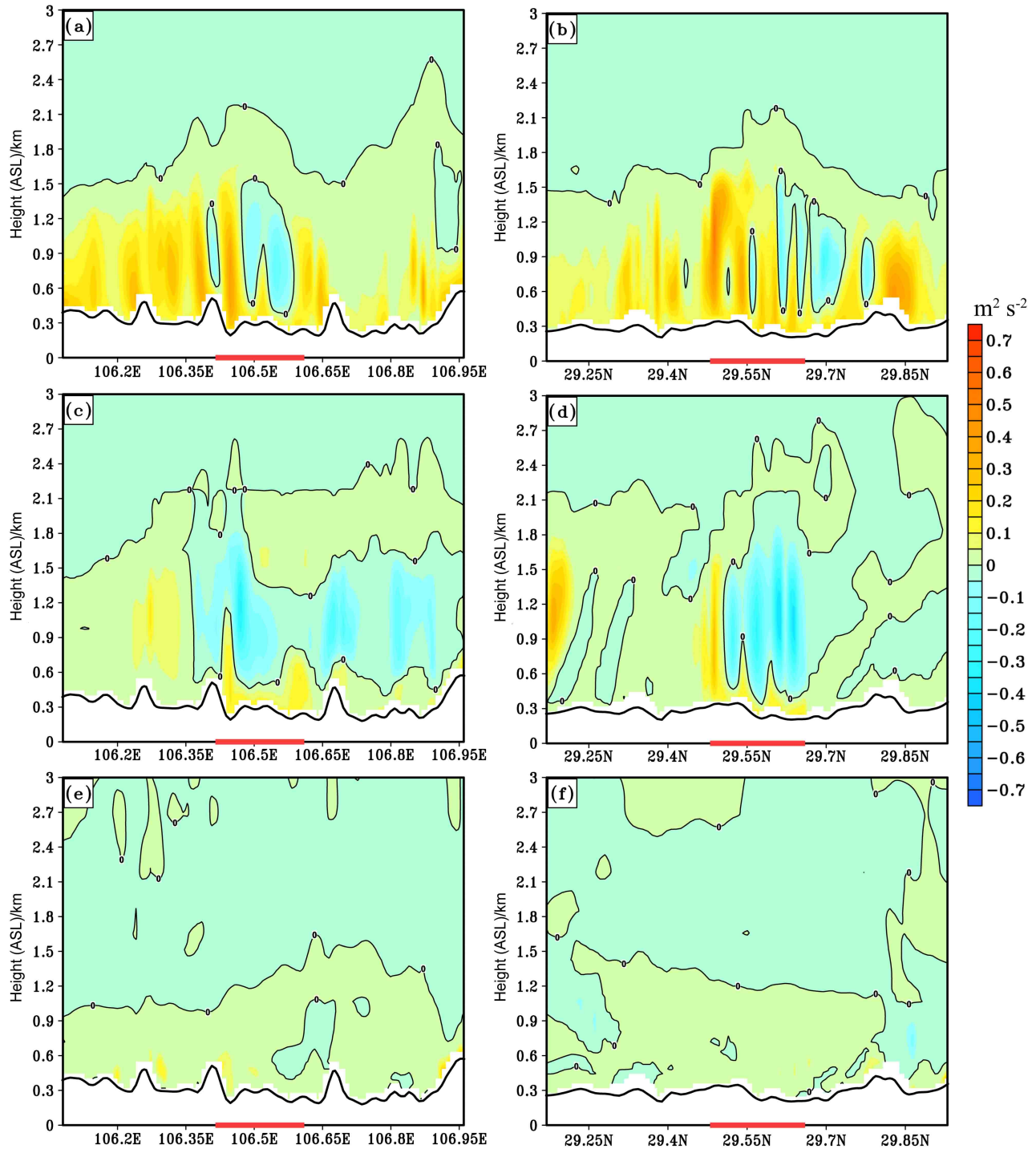


图 11 同图 9, 但为纬向湍流动量通量 $\overline{w'u'}$ (阴影, 单位: $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$)

Fig. 11 Same as Fig. 9, but for turbulent flux of U momentum $\overline{w'u'}$ (shaded, units: $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$)

能力降低, 湍流活动集中在近地面附近 (Wyngaard and Coté, 1971)。至次日 02:00 (图 11e、f), 除部分山顶处存在较强的西风动量的向上输送, 其它地区的输送强度稳定在正负 $0.05 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 以内。

经向湍流动量的输送 ($\overline{w'v'}$) 特征与纬向湍流

动量输送特征相似, 在强度上略有区别。具体表现为 15:00 (图 12a、b), 在城市西侧和南侧边缘处湍流对南风动量有向上输送, 其它区域主要向下输送南风动量, 向下输送的强度也较湍流对西风动量输送的强度强, 最大可达 $0.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 。在城市西侧边

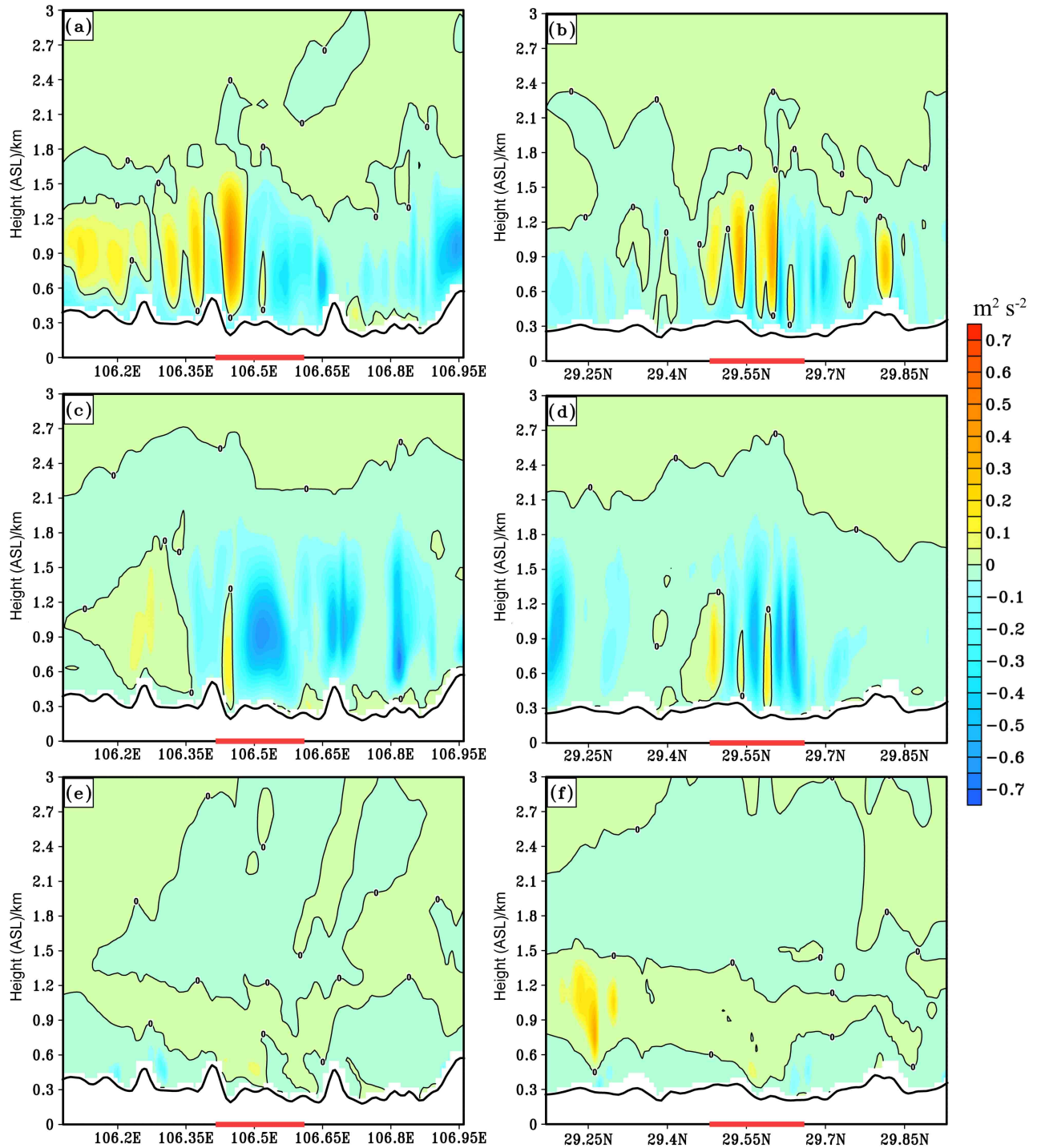


图 12 同图 9, 但为经向湍流动量通量 $\overline{w'v'}$ (阴影, 单位: $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$)

Fig. 12 Same as Fig. 9, but for turbulent flux of V momentum $\overline{w'v'}$ (shaded, units: $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$)

缘处湍流对南风动量的最大上传强度约 $0.35 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, 城市南侧湍流对南风动量的最大上传强度约 $0.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 。至 18:00 (图 12c、d), 城市区域湍流使南风动量下传, 且南风动量输送高度抬升至 1.8 km (ASL), 这是在补充因城市热岛环流发展而造成的南风动量耗散。随着湍流活动强度的减弱, 至 02:00 (图 12e、f), 南风动量在垂直方向上单位时间内的输送强度降低至正负 $0.05 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 以内。

由以上分析可知, 湍流动量通量补充了因热岛环流发展而造成的动量耗散。

不同下垫面处湍流热量通量 ($\overline{w'T'}$) 差别较大 (Barlow, 2014), 因此本文分析了热岛环流不同阶段城市和非城市区域湍流热量通量的垂直分布特征。白天湍流热量通量的垂直分布遵循在边界层低层为正, 高层为负, 自由大气中近似为零的特征, 但不同下垫面处湍流热量通量出现由正转负的高度不同。夜间边界层湍流热量通量为较小的负值。湍流对热量的输送强度随着太阳辐射的增强而增强, 至 13:00 达到最强, 之后开始减弱。至 15:00 (图 13a), 0.7 km (ASL) 以下, 湍流对热量有向上的输送, 城市区域的湍流对热量输送的最大强度约 0.19 K m s^{-1} , 是非城市区域的 5 倍, 出现高度约在 0.3 km (ASL) 处。0.7~1.8 km (ASL) 内城市与非城市区域的湍流对热量有较强的向下输送, 城市区域湍流热量通量的最大强度约 0.075 K m s^{-1} , 非城市区域约 0.015 K m s^{-1} , 这可能是低云的辐射效应 (张梦佳等, 2018)。至 1.8 km (ASL) 以上湍流对热量的输送近似为 0。至 18:00 (图 13b), 非城市区域湍流对热量的输送近似为 0, 城市区域湍流对热量的输送强度降低, 向上输送的最大强度降低至 0.05 K m s^{-1} , 向下输送的最大强度降低至 0.04 K m s^{-1} , 湍流对热量的输送由向上转变为向下所在的高度约 0.5 km (ASL)。至次日 02:00 (图 13c), 湍流对热量的输送强度低于 0.01 K m s^{-1} , 且均是由自由大气向边界层输送。

由以上分析可见, 湍流将地面释放的能量输送至边界层低层, 湍流越强能够到达的高度越高。由于城市区域湍流强度较非城市区域强, 因此城市区域湍流对热量的输送强度更强。

湍流水汽通量 ($\overline{w'q'}$) 的量级较小, 13:00 湍流对水汽的输送最强。至 15:00 (图 14a) 湍流对水汽输送的强度略有减小, 0.7 km (ASL) 以下城市区域湍流对水汽的输送强度弱于非城市区域, 非

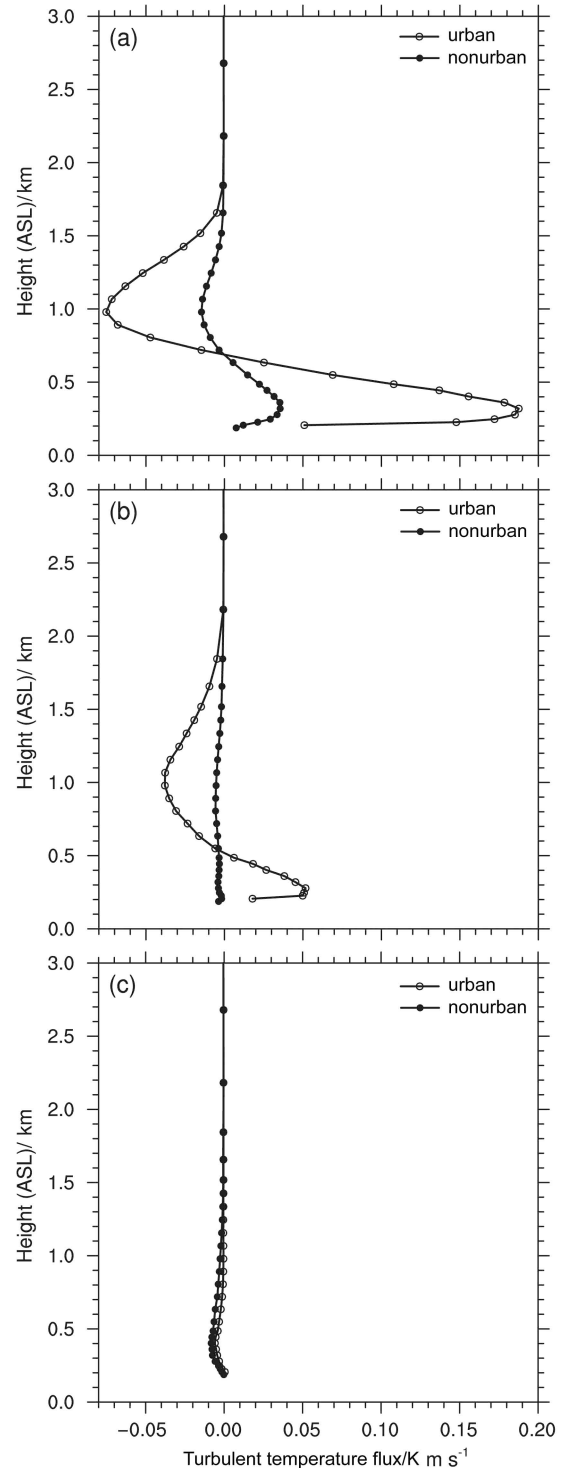


图 13 2016 年 8 月 (a) 17 日 15:00、(b) 18:00 和 (c) 18 日 02:00 城市和非城市区域平均湍流热量通量 $\overline{w'T'}$ 的垂直廓线 (单位: K m s^{-1})

Fig. 13 Vertical profiles of turbulent heat flux $\overline{w'T'}$ (units: K m s^{-1}) averaged over urban and nonurban areas at (a) 1500 BT 17, (b) 1800 BT 17 August, and (c) 0200 BT 18 August, 2016

城市区域湍流水汽通量在 0.4 km (ASL) 处达到最大值 ($1.1 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$)。0.4~1.85 km (ASL) 内城市

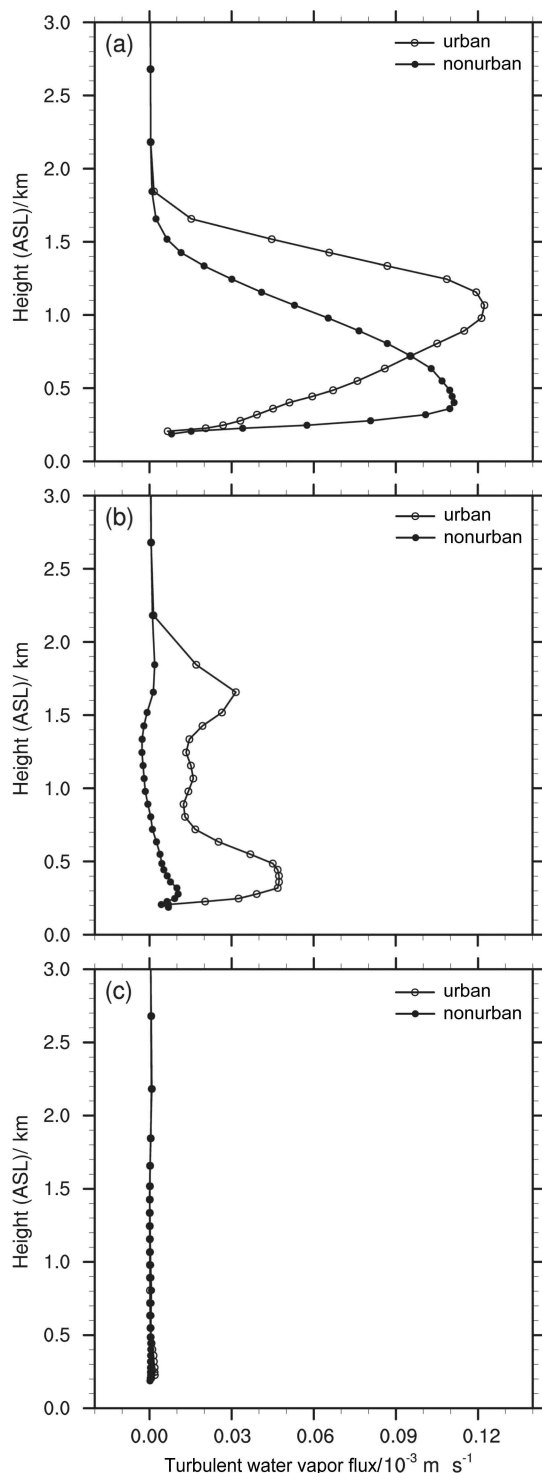


图 14 同图 13, 但为湍流水汽通量 $\overline{w'q'}$ 的垂直廓线 (单位: 10^{-3} m s^{-1})

Fig. 14 Same as Fig. 13, but for turbulent water vapor flux $\overline{w'q'}$ (units: 10^{-3} m s^{-1})

区域湍流对水汽的输送强度强于非城市区域, 城市区域在 1.1 km (ASL) 处强度最强 ($1.2 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$)。至 18:00 (图 14b) 城市区域湍流对水汽的输送强

于非城市区域。非城市 0.8 km (ASL) 以下湍流对水汽有向上的输送作用, 0.8~1.7 km (ASL) 湍流对水汽有向下的输送作用, 强度很小, 这可能与热岛环流的出现有关。至次日 02:00 (图 13c) 湍流对水汽的输送能力很弱, 城市和非城市区域的差别很小。

结合城市热岛环流和湍流动能演变特征可见, 湍流对水汽的输送与湍流的活跃程度有关, 水汽主要由边界层低层向高层输送。由于近地面乡村风将郊区的水汽吹向城市区域, 因此城市区域湍流水汽通量减小速度较非城市区域慢, 至 18:00 依旧有水汽的向上输送; 非城市区域受热岛环流下沉支的影响, 出现水汽向下输送。

由对湍流各项通量的分析可见, 在热岛环流出现期间, 湍流动量通量补充因热岛环流发展而造成的动量耗散。城市和非城市区域下垫面性质存在差异, 因此城市和非城市区域湍流热量通量和湍流水汽通量差异较大。此外, 城市热岛环流影响湍流对水汽的输送。

5 总结与讨论

本文利用 WRF (V3.9) 模式对 2016 年 8 月 17~18 日重庆一次城市热岛环流结构进行了模拟, 分析了热岛环流的三维结构和时间演变特征, 以及热岛环流发生前后湍流动能和各项湍流通量的分布特征。

试验结果表明, 重庆市城市热岛环流主要在午后出现, 夜间消失。该次个例中热岛环流在 15:00 出现, 18:00 达到最强, 至次日 02:00 消失。重庆市的热岛环流受丘陵地形以及长江、嘉陵江的影响, 呈现非对称结构。在背景风场和谷风的影响下, 热岛环流的西支和南支未出现高空回流, 其中西支环流的尺度较小, 约 0.1 个纬距, 最大上升速度约 0.6 m s^{-1} , 低层乡村风风速约 $3 \sim 4 \text{ m s}^{-1}$; 南支环流水平的尺度约 0.2 个经距, 最大上升速度约 0.4 m s^{-1} 。城市热岛环流东支和北支的回流结构较清晰, 两支环流的强度和水平尺度相当, 水平尺度约 0.15 个经距, 水平风速约 $2 \sim 3 \text{ m s}^{-1}$, 最大上升速度约 0.4 m s^{-1} , 在地面之上 0.5 km 左右处出现回流, 环流厚度约 1.4 km。受城市附近丘陵激发的谷风影响, 热岛环流辐合位置偏离城市中心, 且强度减弱。与成都市的城市热岛环流特征相比, 重庆城市热岛环流持续时间长, 但强度和水平尺度均较小。造成这

一差异,一方面可能是受城市规模的影响 (Han and Baik, 2008), 另一方面可能是受重庆市独特的地形、地貌影响 (Ganbat et al., 2015b)。分析重庆城市热岛环流发生前后湍流特征可知,城市区域的湍流较非城市区域活跃,当湍流达到一定强度后会激发城市热岛环流。城乡湍流动能的非均匀分布造成城市区域湍流对热量和水汽的输送较非城市区域强。此外,城市热岛环流影响湍流对水汽的输送;湍流补充热岛环流发展而造成的动量耗散。

需要指出的是,文中涉及的湍流变量和边界层高度为模式输出量,尚需相应的观测资料进行验证。此外,本文仅模拟了重庆一次城市热岛环流过程,湍流通量与城市热岛环流之间的关系仍需要更多的研究来验证。

参考文献 (References)

- Baik J J, Kim Y H, Kim J J, et al. 2007. Effects of boundary-layer stability on urban heat island-induced circulation [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 89(1-2): 73–81. doi:10.1007/s00704-006-0254-4
- Barlow J F. 2014. Progress in observing and modelling the urban boundary layer [J]. *Urban Climate*, 10: 216–240. doi:10.1016/j.uclim.2014.03.011
- Barlow J F, Halios C H, Lane S E, et al. 2015. Observations of urban boundary layer structure during a strong urban heat island event [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 15(2): 373–398. doi:10.1007/s10652-014-9335-6
- Bougeault P, Lacarrère P. 1989. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117(8): 1872–1890. doi:10.1175/1520-0493(1989)117<1872:POOITI>2.0.CO;2
- 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 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129(4): 569–585. doi:10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2
- Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. 2011. The integrated WRF/urban modelling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems [J]. *Int. J. Climatol.*, 31(2): 273–288. doi:10.1002/joc.2158
- 但尚铭, 安海锋, 但玻, 等. 2009. 基于 AVHRR 和 DEM 的重庆城市热岛效应分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 18(7): 680–685. Dan S M, An H F, Dan B, et al. 2009. An Analysis of urban heat island effects in Chongqing based on AVHRR and DEM [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese)*, 18(7): 680–685. doi:10.3969/j.issn.1004-8227.2009.07.016
- Delage Y, Taylor P A. 1970. Numerical studies of heat island circulations [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 1(2): 201–226. doi:10.1007/bf00185740
- 杜云松, 彭珍, 张宁, 等. 2011. 南京地区一次降水过程湍流特征研究 [J]. *南京大学学报 (自然科学)*, 47(6): 703–711. Du Y S, Peng Z, Zhang N, et al. 2011. Turbulent characteristics of surface layer during a heavy precipitation event over the Nanjing area, eastern China [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 47(6): 703–711. doi:10.13232/j.cnki.jnju.2011.06.006
- 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 [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 108(D22): 8851. doi:10.1029/2002JD003296
- 傅抱璞. 1980. 山谷风 [J]. *气象科学*, 1(1-2): 1–14. Fu B P. 1980. Mountain and valley breezes [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 1(1-2): 1–14.
- Ganbat G, Seo J M, Han J Y, et al. 2015a. A theoretical study of the interactions of urban breeze circulation with mountain slope winds [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 121(1-2): 545–555. doi:10.1007/s00704-014-1252-6
- Ganbat G, Baik J J, Ryu Y H. 2015b. A numerical study of the interactions of urban breeze circulation with mountain slope winds [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 120(1-2): 123–135. doi:10.1007/s00704-014-1162-7
- Han J Y, Baik J J. 2008. A theoretical and numerical study of urban heat island-induced circulation and convection [J]. *J. Atmos. Sci.*, 65(6): 1859–1877. doi:10.1175/2007jas2326.1
- Han J Y, Baik J J, Lee H. 2014. Urban impacts on precipitation [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(1): 17–30. doi:10.1007/s13143-014-0016-7
- 何松蔚, 王成刚, 姜海梅, 等. 2018. 2015 年冬季苏州城市热岛特征研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 27(9): 2078–2089. He Songwei, Wang Chenggang, Jiang Haimei, et al. 2018. Research on the characteristics of urban heat island effect in Suzhou in the winter of 2015 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese)*, 27(9): 2078–2089. doi:10.11870/cjlyzyyhj201809018
- 何泽能, 李永华, 陈志军, 等. 2008. 重庆市 2006 年夏季城市热岛分析 [J]. *热带气象学报*, 24(5): 527–532. He Zeneng, Li Yonghua, Chen Zhijun, et al. 2008. Analysis of the urban heat island in 2006 summer in Chongqing City [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 24(5): 527–532. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2008.05.017
- 何泽能, 杨世琦, 唐晓萍, 等. 2010. 重庆市城市热岛研究的现状需求和建设 [J]. *高原山地气象研究*, 30(4): 85–88. He Zeneng, Yang Shiqi, Tang Xiaoping, et al. 2010. The actuality, demands and suggestions of urban heat island research in Chongqing [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese)*, 30(4): 85–88. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2010.04.015
- 何泽能, 左雄, 白莹莹, 等. 2013. 重庆市城市高温变化特征分析及对策初探 [J]. *高原气象*, 32(6): 1803–1811. He Zeneng, Zuo Xiong, Bai Yingying, et al. 2013. Characteristics and countermeasures of urban high temperature in Chongqing City [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 32(6): 1803–1811. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00167
- 何泽能, 高阳华, 杨世琦, 等. 2017. 重庆市城市热岛效应变化特征及

- 减缓措施 [J]. *高原山地气象研究*, 37(4): 48–52. He Zeneng, Gao Yanghua, Yang Shiqi, et al. 2017. The characteristics and mitigating measures of urban heat island effect of Chongqing [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese)*, 37(4): 48–52. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2017.04.008
- Hidalgo J, Pigeon G, Masson V. 2008a. Urban-breeze circulation during the CAPITOU experiment: Observational data analysis approach [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 102(3-4): 223–241. doi:10.1007/s00703-008-0329-0
- Hidalgo J, Masson V, Pigeon G. 2008b. Urban-breeze circulation during the CAPITOU experiment: Numerical simulations [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 102(3-4): 243–262. doi:10.1007/s00703-008-0345-0
- Hidalgo J, Masson V, Gimeno L. 2010. Scaling the daytime urban heat island and urban-breeze circulation [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(5): 889–901. doi:10.1175/2009JAMC2195.1
- 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 [J]. *大气科学学报*, 35(5): 620–632. Huang Liping, Miao Junfeng, Liu Yuekun. 2012. Spatial and temporal variation characteristics of urban heat island in Tianjin [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35(5): 620–632. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2012.05.002
- 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 [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 113(D13): D13103. doi:10.1029/2008JD009944
- 贾春晖, 窦晶晶, 苗世光, 等. 2019. 延庆-张家口地区复杂地形冬季山谷风特征分析 [J]. *气象学报*, 77(3): 475–488. Jia Chunhui, Dou Jingjing, Miao Shiguang, et al. 2019. Analysis of characteristics of mountain-valley winds in the complex terrain area over Yanqing-Zhangjiakou in the winter [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 77(3): 475–488. doi:10.11676/qxxb2019.033
- 姜平, 刘晓冉, 朱浩楠, 等. 2019. 复杂地形下局地山谷风环流的理想数值模拟 [J]. *高原气象*, 38(6): 1272–1282. Jiang Ping, Liu Xiaoran, Zhu Haonan, et al. 2019. Idealized numerical simulation of local mountain-valley winds over complex topography [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 38(6): 1272–1282. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00019
- Kain J S. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43(1): 170–181. doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2
- 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 [J]. *J. Meteor. Soc. Japan. Ser. II*, 82(1): 67–80. doi:10.2151/jmsj.82.67
- Lemonsu A, Masson V. 2002. Simulation of a summer urban breeze over Paris [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 104(3): 463–490. doi:10.1023/A:1016509614936
- 李晓敏, 曾胜兰. 2015. 成都、重庆城市热岛效应特征对比 [J]. *气象科技*, 43(5): 888–897. Li Xiaomin, Zeng Shenglan. 2015. Comparative research on characteristics of urban heat island effects between Chengdu and Chongqing [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 43(5): 888–897. doi:10.19517/j.1671-6345.2015.05.018
- 李子华, 唐斌, 任启福. 1993. 重庆市区冬季热岛和湿岛效应的研究 [J]. *地理学报*, 48(4): 358–366. Li Zihua, Tang Bin, Ren Qifu. 1993. A study on the effects of the heat and wet island in the city of Chongqing during wintertime [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 48(4): 358–366. doi:10.11821/xb199304007
- 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 [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 119(11): 6325–6346. doi:10.1002/2014JD021871
- 李军, 赵彤, 朱维, 等. 2018. 基于 Landsat8 的重庆主城区城市热岛效应研究 [J]. *山地学报*, 36(3): 452–461. Li Jun, Zhao Tong, Zhu Wei, et al. 2018. Urban heat island effect based on Landsat8 image in urban districts of Chongqing, China [J]. *Mountain Research (in Chinese)*, 36(3): 452–461. doi:10.16089/j.cnki.1008-2786.000341
- Liu C X, Li Y C. 2018. Spatio-temporal features of urban heat island and its relationship with land use/cover in mountainous city: A case study in Chongqing [J]. *Sustainability*, 10(6): 1943. doi:10.3390/SU10061943
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22(6): 1065–1092. doi:10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2
- 刘树华, 茅宇豪, 胡非, 等. 2009. 不同下垫面湍流通量计算方法的比较研究 [J]. *地球物理学报*, 52(3): 616–629. Liu Shuhua, Mao Yuhao, Hu Fei, et al. 2009. A comparative study of computing methods of turbulent fluxes on different underlying surfaces [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 52(3): 616–629.
- 刘鹏飞, 刘树华, 胡非, 等. 2010. 湍流通量计算方法和误差的比较研究 [J]. *气象学报*, 68(4): 487–500. Liu Pengfei, Liu Shuhua, Hu Fei, et al. 2010. A comparison of the different methods for estimating turbulent fluxes and their errors [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 68(4): 487–500. doi:10.11676/qxxb2010.047
- Liu X J, Tian G J, Feng J M, et al. 2018. Assessing summertime urban warming and the cooling efficacy of adaptation strategy in the Chengdu-Chongqing metropolitan region of China [J]. *Science of the Total Environment*, 610–611: 1092–1102. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.08.082
- 刘阳, 刘辉志, 王雷. 2017. 北京城市下垫面大气边界层湍流输送垂直分布特征 [J]. *中国科学: 地球科学*, 60(8): 1533–1545. Liu Yang, Liu Huizhi, Wang Lei. 2017. The vertical distribution characteristics of integral turbulence statistics in the atmospheric boundary layer over an urban area in Beijing [J]. *Science China Earth Sciences*, 60(8): 1533–1545. doi:10.1007/s11430-016-9050-5
- Lu J, Pal Arya S, Snyder W H, et al. 1997. A laboratory study of the urban heat island in a calm and stably stratified environment. Part II: Velocity field [J]. *J. Appl. Meteor.*, 36(10): 1392–1402. doi:10.1175/1520-0450(1997)036<1392:ALSOTU>2.0.CO;2
- Lu J, Li C D, Yu C, et al. 2012. Regression analysis of the relationship between urban heat island effect and urban canopy characteristics in a mountainous city, Chongqing [J]. *Indoor and Built Environment*,

- 21(6): 821–836. doi:10.1177/1420326X12461659
- Luo X B, Li W S. 2014. Scale effect analysis of the relationships between urban heat island and impact factors: Case study in Chongqing [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1): 084995. doi:10.1117/1.JRS.8.084995
- Ma Y, Zeng X M, Zhang Y, et al. 2017. Impact of the choice of land surface scheme on a simulated heatwave event: The case of Sichuan-Chongqing area, China [J]. *Advances in Meteorology*, 2017: 9545896. doi:10.1155/2017/9545896
- 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 [J]. *大气科学学报*, 37(4): 521–528. Miao Junfeng. 2014. An overview of numerical studies of interaction of urban heat island and sea breeze circulations [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(4): 521–528. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20140503001
- Miao J F, Chen D, Wyser K, et al. 2008. Evaluation of MM5 mesoscale model at local scale for air quality applications over the Swedish west coast: Influence of PBL and LSM parameterizations [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 99(1-2): 77–103. doi:10.1007/s00703-007-0267-2
- Pielke Sr R A. 2002. *Mesoscale Meteorological Modeling*[M]. San Diego, CA: Academic Press.
- 任启福. 1992. 重庆城市热岛效应 [J]. *重庆环境科学*, 14(3): 37–41. Ren Qifu. 1992. Urban heat island effect in Chongqing [J]. *Chongqing Environmental Science (in Chinese)*, 14(3): 37–41.
- Roth M, Oke TR. 1995. Relative efficiencies of turbulent transfer of heat, mass, and momentum over a patchy urban surface [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52(11): 1863–1874. doi:10.1175/1520-0469(1995)052<1863:REOTTO>2.0.CO;2
- 桑建国, 张治坤, 张伯寅. 2000. 热岛环流的动力学分析 [J]. *气象学报*, 58(3): 321–327. Sang Jianguo, Zhang Zhikun, Zhang Boyin. 2000. Dynamical analyses on heat island circulation [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 58(3): 321–327. doi:10.11676/qxxb2000.033
- 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 [J]. *地球物理学报*, 60(8): 3023–3040. Su Tao, Miao Junfeng, Wang Yuhui. 2017. Impact of radiative transfer parameterizations on simulated sea breeze thunderstorm over the Hainan Island [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 60(8): 3023–3040. doi:10.6038/cjg20170811
- Sun Y X, Fang J. 2013. Numerical study on the initiation of the severe convective weather in Chongqing on 6 May 2010 [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 27(3): 364–378. doi:10.1007/s13351-013-0308-3
- 孙永, 王咏薇, 高阳华, 等. 2019. 复杂地形条件下城市热岛及局地环流特征的数值模拟 [J]. *大气科学学报*, 42(2): 280–292. Sun Yong, Wang Yongwei, Gao Yanghua, et al. 2019. Numerical simulation of urban heat island and local circulation characteristics under complex terrain conditions [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(2): 280–292. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180204001
- 田越, 苗峻峰, 赵天良. 2020. 污染天气下成都东部山地-平原风环流结构的数值模拟 [J]. *大气科学*, 44(1): 53–75. Tian Yue, Miao Junfeng, Zhao Tianliang. 2020. A numerical simulation of mountain-plain breeze circulation during a heavy pollution event in eastern Chengdu [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 44(1): 53–75. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18209
- Vukovich F M. 1971. Theoretical analysis of the effect of mean wind and stability on a heat island circulation characteristic of an urban complex [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 99(12): 919–926. doi:10.1175/1520-0493(1971)099<0919:TAOTEO>2.3.CO;2
- Wang D, Miao J F, Tan Z M. 2013. Impacts of topography and land cover change on thunderstorm over the Huangshan (Yellow Mountain) area of China [J]. *Natural Hazards*, 67(2): 675–699. doi:10.1007/s11069-013-0595-0
- 王莹, 苗峻峰. 2019. 近地层参数化对海南岛海风降水模拟的影响 [J]. *地球物理学报*, 62(1): 32–48. Wang Ying, Miao Junfeng. 2019. Impact of surface layer parameterizations on simulated sea breeze precipitation over the Hainan Island [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 62(1): 32–48. doi:10.6038/cjg2018K0551
- 王卫国, 蒋维楣, 陈家华. 1997. 海陆风环流及其湍流特征模拟试验 [J]. *气象科学*, 17(1): 52–57. Wang Weiguo, Jiang Weimei, Chen Jiahua. 1997. The simulation experiment on sea-land breeze and its turbulence characteristic [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 17(1): 52–57.
- 王咏薇, 伍见军, 杜钦, 等. 2013. 不同城市冠层参数化方案对重庆高密度建筑物环境的数值模拟研究 [J]. *气象学报*, 71(6): 1130–1145. Wang Yongwei, Wu Jianjun, Du Qin, et al. 2013. Numerical study of the Chongqing high-density buildings environment by the WRF with the different urban canopy schemes [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 71(6): 1130–1145. doi:10.11676/qxxb2013.086
- 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 [J]. *环境科学学报*, 35(11): 3452–3462. Wang Shan, Liao Tingting, Wang Lili, et al. 2015. Atmospheric characteristics of a serious haze episode in Xi'an and the influence of meteorological conditions [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 35(11): 3452–3462. doi:10.13671/j.hjkxxb.2015.0100
- 王成刚, 李颖, 曹乐, 等. 2017a. 苏州东山冬季大气边界层结构特征及其对污染物浓度的影响 [J]. *热带气象学报*, 33(6): 912–921. Wang Chenggang, Li Ying, Cao Le, et al. 2017a. Analysis on atmospheric boundary layer structure and its effect on pollution concentration over Dongshan, Suzhou in winter [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 33(6): 912–921. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2017.06.012
- 王成刚, 沈滢洁, 罗峰, 等. 2017b. 晴天及阴天条件下 WRF 模式中几种边界层参数化方案的对比分析研究 [J]. *地球物理学报*, 60(3): 924–934. Wang Chenggang, Shen Yingjie, Luo Feng, et al. 2017b. Comparison and analysis of several planetary boundary layer schemes in WRF model between clear and overcast days [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 60(3): 924–934. doi:10.6038/cjg20170307
- 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 [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 122(8): 4332–4352. doi:10.1002/2017JD026702
- White C D, Bian X D, Sutherland J L. 1999. Wintertime surface wind patterns in the Colorado River valley [J]. *J. Appl. Meteor.*, 38(8): 1118–1130. doi:10.1175/1520-0450(1999)038<1118:WSWPIT>2.0.

- CO₂
- 伍见军, 王咏薇, 朱彬, 等. 2013. WRF 模式中城市冠层参数化方案在重庆气象环境模拟中的性能比较 [J]. 长江流域资源与环境, 22(12): 1627–1634. Wu Jianjun, Wang Yongwei, Zhu Bin, et al. 2013. Performance comparison of different urban canopy schemes in WRF model under Chongqing meteorological simulation [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 22(12): 1627–1634.
- Wyngaard J C, Côté O R. 1971. The budgets of turbulent kinetic energy and temperature variance in the atmospheric surface layer [J]. *J. Atmos. Sci.*, 28(2): 190–201. doi:10.1175/1520-0469(1971)028<0190:TBOTKE>2.0.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.1000-0526.2011.3.007
- 徐蓉, 苗峻峰, 谈哲敏. 2013. 南京地区城市下垫面特征对雷暴过程影响的数值模拟 [J]. 大气科学, 37(6): 1235–1246. Xu Rong, Miao Junfeng, Tan Zhemin. 2013. Numerical simulation of the impact of urban underlying surface characteristics on thunderstorm in Nanjing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(6): 1235–1246. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12128
- 杨秋彦, 苗峻峰, 王语卉. 2019. 边界层参数化对海南岛海风环流结构模拟的影响 [J]. 热带气象学报, 35(2): 234–252. Yang Qiuyan, Miao Junfeng, Wang Yuhui. 2019. Impact of planetary boundary layer parameterizations on simulated sea breeze circulation over the Hainan Island [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 35(2): 234–252. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2019.021
- 张璐, 杨修群, 汤剑平, 等. 2011. 夏季长三角城市群热岛效应及其对大气边界层结构影响的数值模拟 [J]. 气象科学, 31(4): 431–440. Zhang Lu, Yang Xiuqun, Tang Jianping, et al. 2011. Simulation of urban heat island effect and its impact on atmospheric boundary layer structure over Yangtze River Delta region in summer [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 31(4): 431–440. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2011.04.010
- 张梦佳, 沈学顺, 何平, 等. 2018. 基于风廓线仪的华南地区夏季边界层湍流统计特征研究 [J]. 热带气象学报, 34(4): 535–545. Zhang Mengjia, Shen Xxueshun, He Ping, et al. 2018. Turbulent structure of the boundary layer in summer over South China as revealed by wind profiler [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 34(4): 535–545. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2018.04.011
- 朱丽, 苗峻峰. 2019. 中国地区城市热岛环流研究进展 [J]. 气象科技, 47(1): 52–61. Zhu Li, Miao Junfeng. 2019. Overview of urban breeze circulation studies in China [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 47(1): 52–61. doi:10.19517/j.1671-6345.20170737
- 朱焱, 刘红年, 沈建, 等. 2016. 苏州城市热岛对污染扩散的影响 [J]. 高原气象, 35(6): 1584–1594. Zhu Yan, Liu Hongnian, Shen Jian, et al. 2016. Influence of urban heat island on pollution diffusion in Suzhou [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 35(6): 1584–1594. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00084