

文章编号: 2096-1618(2020)04-0464-07

城市化进程下四川盆地冬季昼夜局地环流的差异分析

陈笑笑, 程志刚, 张月悦
(成都信息工程大学, 四川 成都 610225)

摘要:为研究不同城市化阶段四川盆地冬季局地环流的差异,选取四川盆地城市化进程的3个代表时期2005/2006、2010/2011、2015/2016年冬季(以次年1月数据代表)的FNL逐日再分析资料,利用气象统计分析方法,对盆地冬季局地环流进行了城市化昼夜变化特征对比分析。结果表明,冬季四川盆地爬流运动占主导,城市化进程下,绕爬流分量和水平风场减弱,经向垂直运动加强至50 hPa/s以上,高原附近的爬流运动,对山谷风形成有积极作用。湿度场在高原与盆地间有显著差异,相对湿度西低东高,夜晚,盆地相对湿度增加,边界层高度则相反;城市化进程下,盆地中心干岛加深、边界层高度变化不明显。盆地内绝对涡度为正,且对流层中高层大于低层,城市化进程下绝对涡度增大,夜晚高层辐合作用增强,有利于下沉运动。

关键词:大气科学;气候变化与数值模拟;四川盆地;城市化;局地环流;昼夜变化

中图分类号:P463.3

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2020.04.016

0 引言

21世纪以来城市化的推进速度呈现空前的增长,中国的城市化率在2014年已经比2000年的36.22%增长了50%,城市作为高人口密度、高经济密度的特殊载体,受气候影响的变化最大^[1-2]。四川盆地位于青藏高原东部,是中国和世界人口最多的区域之一。作为中国各大盆地中形态最典型、纬度最南、海拔最低的盆地,通过其地形作用和自身城市化的发展,改变着盆地内区域环流和局地天气气候,对区域内气候变化和经济发展产生重要影响。城市化是人类活动引起土地利用变化的极端表现,在城市下垫面动力、热力等作用下产生的城市热岛环流,不仅可以影响局地 and 区域气候,甚至可以影响大尺度的大气环流,常造成高影响天气^[3-6]。

随着城市化的发展,当山体周围存在城市、水体、冰雪、植被等复杂下垫面时,山地风系或山谷风环流往往与海陆风、湖陆风、城市热岛、植被风、冰川风环流等中小尺度环流相耦合,共同组成复杂的山地环流,其局地环流特征也不尽相同^[7-9]。李斐等^[10]研究青藏高原绕流和爬流的气候学特征时发现,高原主体年平均爬流分量为偏南上坡风,东北部为偏北上坡风。邹捍等^[11]和Zhang等^[12]发现,青藏高原的大型山地环流对东亚和全球的气候具有显著影响,中国第1、2阶梯地形所产生的热力山地-平原风环流的上升支使西南涡以及梅雨期降水量增加。李维亮等^[13]研究长三角地区时发现,在无城市热岛情况下,海陆风和湖陆风与陆地风相互作用,形成一条经上海沿长江的风切变线和一条沿太湖东北岸-东南岸的弱切变辐合线;在有

城市热岛情况下,城市的热岛环流与海陆风、湖陆风在不同高度层相互影响,上海沿长江的风切变线在上海市区及东侧上升气流加强。孙永等^[14]模拟重庆地区城市和非城市下垫面热岛分布特征,结果表明,局地环流呈现越靠近山区地形较高处风速大,山谷城市区域风速小的特性,且山脉对城市出流有阻碍作用,促进城市热岛效应加强。席世平等^[15]利用MM5模式模拟河南省西部山区的局地环流,研究表明,太行山南麓和熊耳山东侧均存在因地形热力作用而形成的山谷风。王腾蛟等^[16]研究城市下垫面对兰州冬季热岛环流影响时发现,城市下垫面对兰州市热岛强度的贡献率为44%,热岛环流的上升运动促进了山风环流,抑制了谷风环流的形成与发展。高艳红等^[17]模拟黑河地区非均匀下垫面局地小气候效应,再现了山谷风环流及夏季“绿洲效应”、沙漠上的“逆湿”和由于地表热力分布不均匀引起的绿洲-沙漠垂直环流等绿洲-沙漠相互作用的典型特征。Lin等^[18]利用中尺度模式MM5对中国台北的城市热岛进行模拟,指出复杂地形中的热岛效应与局地环流存在明显的相互影响。

四川盆地地处青藏高原东侧,位于中国地势第二阶梯上。盆地地形复杂,使得冬季污染不易扩散,夏季常有引起强降水的西南涡,同时高原东部的气流扰动、山谷风和城市热岛环流等也是引起盆地冬、夏季节天气气候变化的重要因素。陈玉蓉等^[19]研究发现高原和四川盆地间的山谷风对霾的日变化有明显影响。孙海燕等^[20]研究发现贵州山区山谷风环流明显,并随气层不稳定程度的增加而递增,在夜间达到最大。李晓敏等^[21]和程志刚等^[22]研究表明成都市的城市热岛效应呈现环状分布特征,昼夜变化大,而重庆市呈现西北高东南低的分布特征,在10年间呈现扩大趋势,且春季最强。但尚铭等^[23]研究发现四川盆地中部中小城市的热岛规模后期为前期的1.17~3.03倍,热岛规模

收稿日期:2019-12-05

资助项目:国家科技基础资源调查专项资助项目(2017FY100903),
国家自然科学基金资助项目(41971026)

的增幅有自西向东增大的趋势。

虽对盆地山谷风^[24-25]、城市化热岛环流变化^[26-27]等开展了大量研究,但从城市化发展进程的角度出发,将城市化和山谷风共同影响下的局地环流进行对比定量分析研究较少甚至没有。因此,以城市化进程下四川盆地昼夜局地环流变化特征对比分析为切入点,选取代表性年份,分析风场、湿度场等要素之间的昼夜差异,以期进一步了解城市化背景下山风、谷风与城市热岛叠加影响下环境风场、涡度场等水平、垂直变化特征,为气象防灾减灾及未来城市规划和通风走廊设计等提供参考依据。

1 资料与方法

选取 2006 年 1 月、2011 年 1 月、2016 年 1 月代表 2005 年、2010 年、2015 年冬季,并作为不同城市化阶段的代表年份。分析数据是由美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 FNL 逐日 4 小时次再分析资料,格点分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 和美国国家海洋和大气管理局(NOAA <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>) 提供的 ETOPO1 数据,分辨率为 $1'$ 。分析要素如下:sig995 的表层风场、等压面的垂直运动场和绝对涡度、2 m 的相对湿度、边界层高度。由于 sig995 表层风场在复杂地

形和高原上受下垫面引起的空间插值影响较小,故用其代替 10 m 的水平风场研究地表风速变化。研究区域为青藏高原东南侧($24^{\circ}\text{N} \sim 36^{\circ}\text{N}$, $101^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$)的四川盆地,绕流和爬流运动的计算方法参考文献[10,28]。

2 结果分析

2.1 城市化进程的代表时间段

2000 年以来,中国城市化综合水平突破 5%,由稳步发展时期进入高速发展时期^[29]。西南相对东部地区而言,城市化综合水平较低,且盆地内省份/城市发展水平显著高于周边区域,四川省盆地内城市发展水平基本反映盆地内城市化进程。《四川省国民经济和社会发展统计公报》显示(图 1),2005 年以来四川省国民生产总值每隔 5 年成倍增长,固定资产投资占 GDP 比例由 46.9% 增长至 86.4%;城市化水平(城镇人口/总人口)也呈显著增长趋势,城镇化率 10 年增长了 45% 左右;城乡居民恩格尔系数逐渐衰减,2010 年有所回落,至 2015 年系数发生显著减小;第一产业成比例削减,由此可见 2005 年、2010 年、2015 年可代表四川盆地 3 个不同城市化高速发展时期。

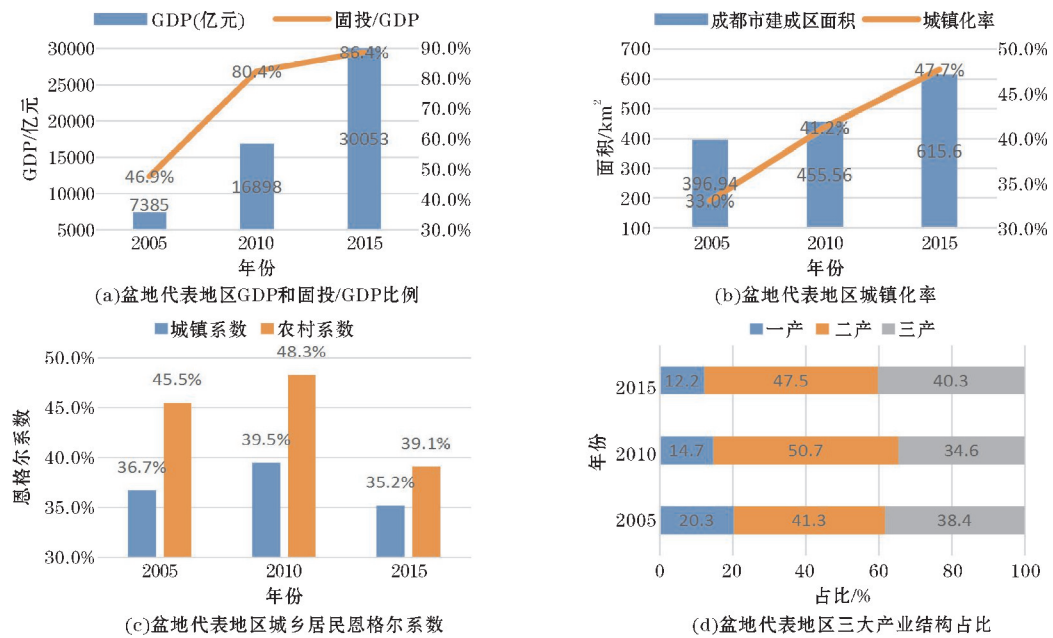


图 1 盆地代表地区的国民经济和社会发展情况

2.2 局地环流的昼夜特征对比分析

随着城市化进程的加快,盆地内局地环流发生了不同程度的改变,为研究不同城市化进程下盆地冬季局地环流的差异特征,选取城市化发展 3 个阶段的次年 1 月昼夜典型时刻(14:00,02:00)作为代表,以期为后续研究局地环流变化的影响机制提供基础支撑。

2.2.1 风场的昼夜变化特征

Trenberth 指出大气对青藏高原地形动力作用存

在行星尺度响应的临界高度为 1500 m ^[30],此临界高度正是绕流和爬流强度相当的青藏高原高度。为研究风场对地形的响应作用和四川盆地及其附近地区的绕流和爬流运动特征,将图 2 阴影区设置为海拔高度大于 1500 m 的区域。由盆地内冬季绕流和爬流分量(图 2)可知,绕流和爬流运动均呈现盆地西侧高于东侧,且爬流强度显著大于绕流强度,高值区主要集中于盆地西北侧,低值区位于盆地中东部,绕流最大值为 5 m/s ,爬流最大值可达 6.5 m/s ,可能是由于盆地西侧处于青藏

高原的东侧边缘,地形对气流的动力作用较强,冬季西风气流北抬,南支绕流减弱,且最大值均出现在2006年1月。随着城市化的加剧,绕流和爬流强度逐渐降低,且盆地近高原一侧显著减弱,可能是因为城市化的建设对绕流和爬流运动有了一定的阻挡作用。

此外,绕流和爬流分量的空间分布(图2)还表明,四川盆地冬季爬流运动占主导,且高原爬流分量显著大于盆地。纬向爬流分量(图3a,3b,3e,3f,3i,3j)白

天沿高原主体与盆地形成显著差异,盆地至近高原一侧为东风上坡爬流,最高可达3 m/s,凌晨爬流分量显著减弱,东西风爬流边界东移,近高原一侧转为西风下坡气流,速度最大可达2 m/s。经向爬流分量由白天的偏南风上坡气流转为凌晨的偏北风下坡气流,这与李斐等^[10]研究一致,可见盆地内的爬流运动对山谷风的形成具有一定的积极影响。随着城市化进程的加快,爬流分量逐渐减小,盆地的越山气流减弱。

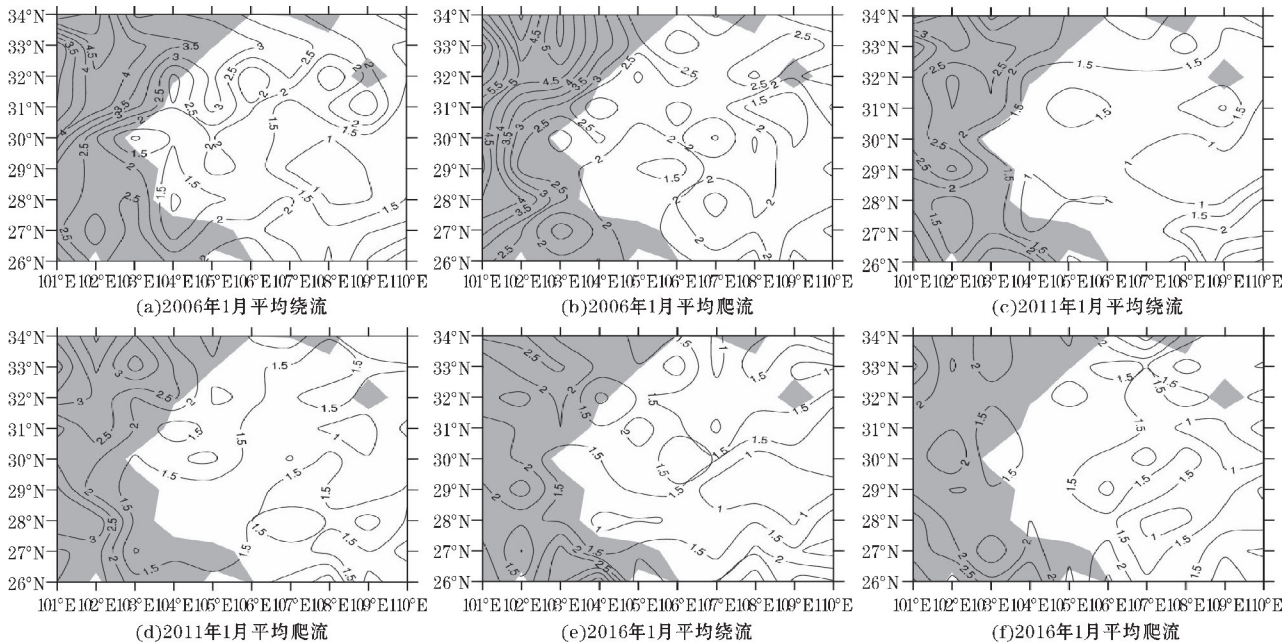


图2 四川盆地及其附近地区1月平均绕流和爬流矢量模的空间分布(阴影为地形高度超过1500m的区域)

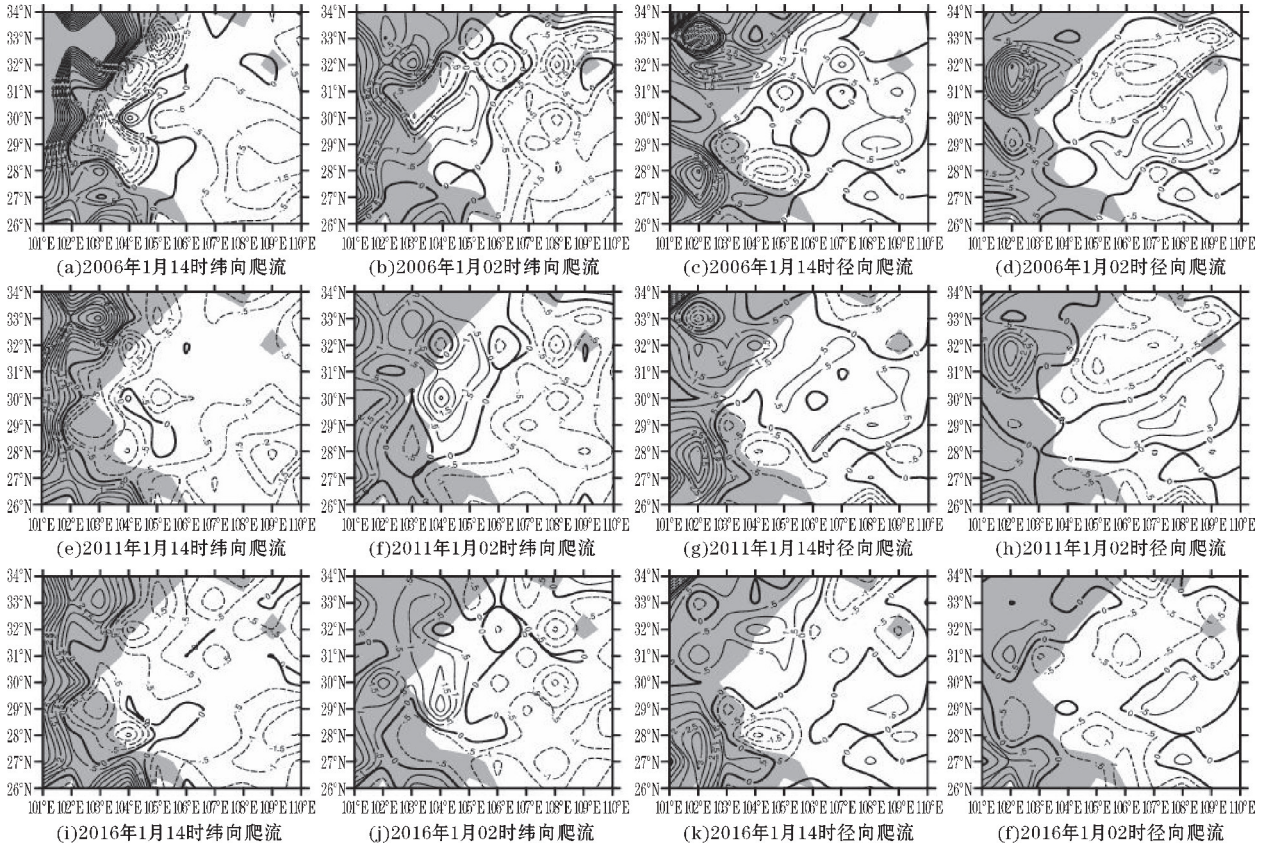


图3 四川盆地及其附近地区纬向爬流和经向爬流分量的昼夜空间分布图

盆地水平风矢量的昼夜分布分析显示(图 4),盆地西部边缘103 °E以东,白天为偏东风环流,夜晚转为偏西风环流,与盆地白天吹谷风,夜晚吹山风对应,环

流形式与图 3 昼夜爬流分量保持一致。城市化发展下,盆地内水平风速减小,这与程志刚等^[31]的研究保持一致,山谷风昼夜环流减弱。

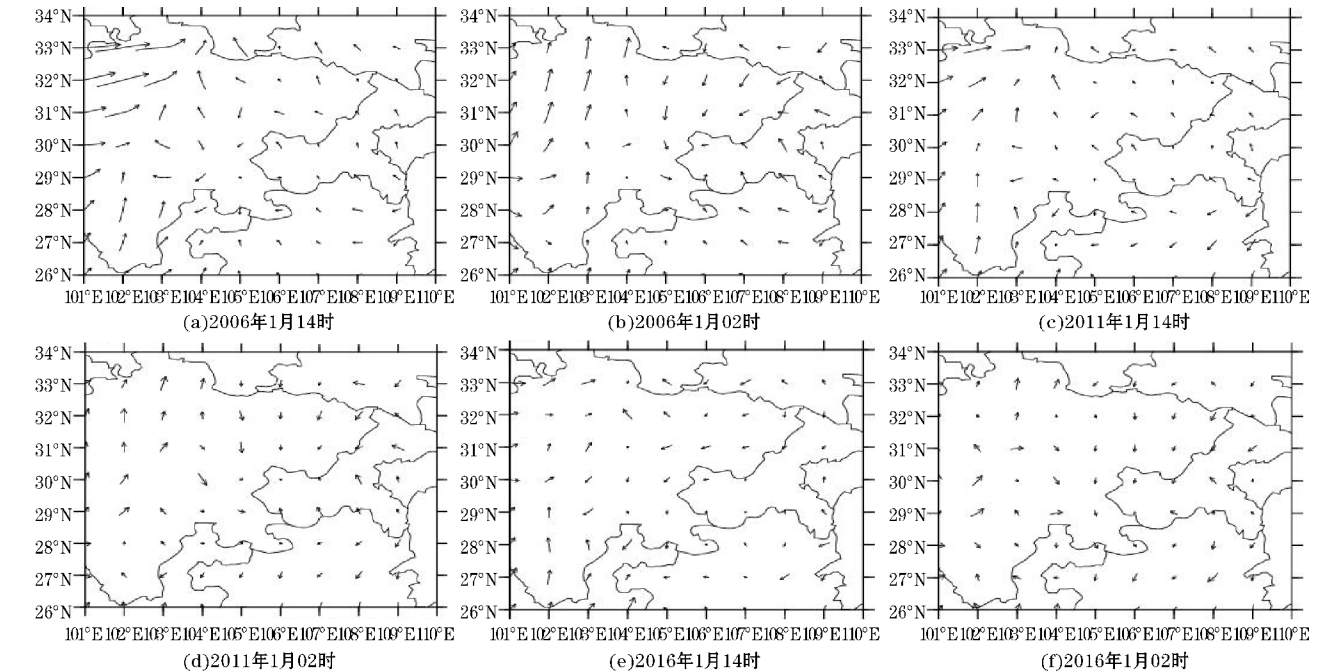


图 4 四川盆地及其附近地区水平风矢量的昼夜空间分布图

分析四川盆地及其附近地区沿30 °N的经向垂直风速昼夜差异(图 5)时发现,昼夜垂直风速与月平均趋势(图略)保持一致,在700 hPa以下,白天近高原一侧 $w<0$ 主要为下沉运动,速度最大可达35 hPa/s,以东盆地中心区域 $w>0$,主要为上升运动,上升速度最大可达20 hPa/s,因为盆地白天受太阳辐射增温较快;

500 hPa以上高原附近主要为上升运动。夜晚盆地辐射降温,下沉运动区域增加,速度增大,垂直方向可达对流层顶,中高层上升运动区断裂,最大下沉速度可达20 hPa/s。城市化下垫面的改变使得粗糙度加大,垂直运动加强,同时城市化进程的演变下,高原下沉运动区域上沿至300 hPa,且昼夜垂直速度差减弱。

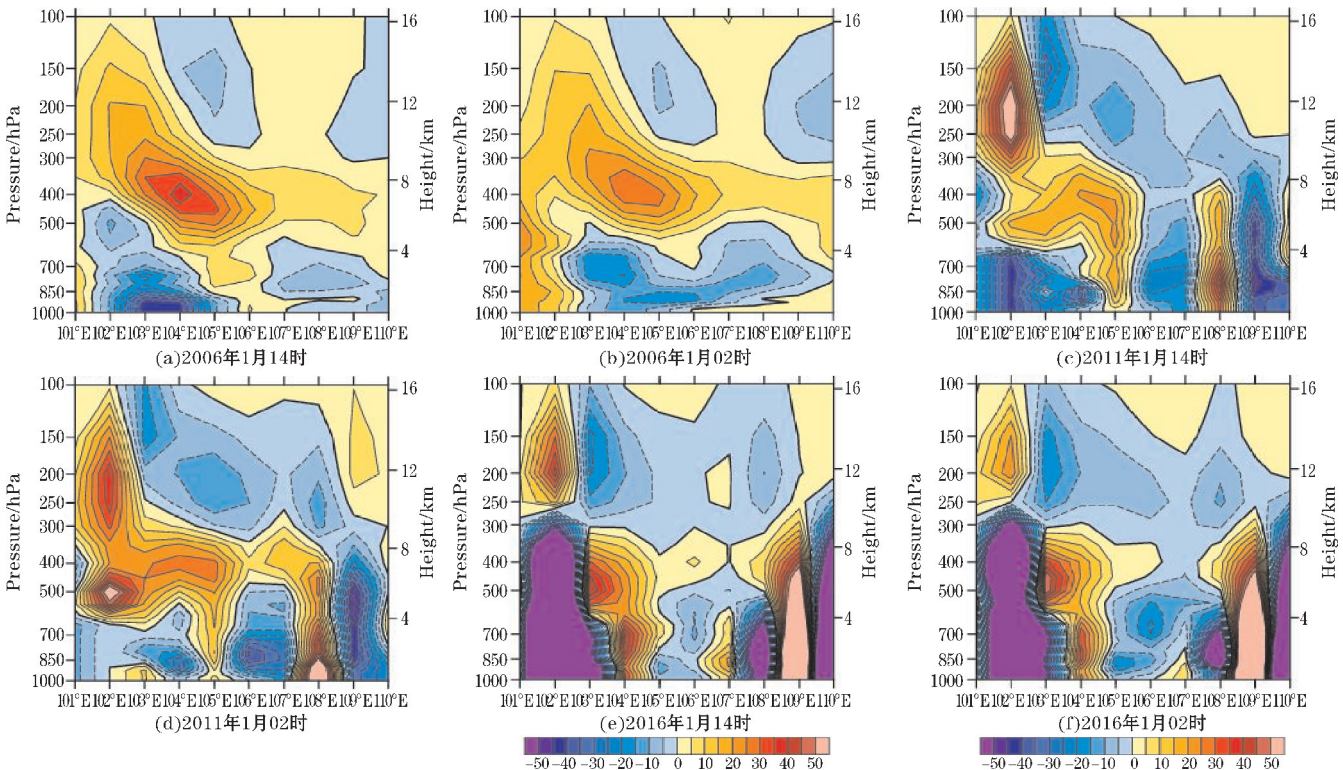


图 5 四川盆地及其附近地区沿30 °N的经向垂直风速昼夜剖面图

2.2.2 湿度场的昼夜变化特征分析

对比分析盆地相对湿度昼夜空间差异(图6),不难看出,其昼夜空间分布与月平均分布趋势(图略)保持一致,呈现西低东高,在盆地中心的成都等地区形成区域性的城市干岛,高原和盆地交界处形成一条干湿边界线。究其原因,可能是由于水汽由盆地中心城市向周围输送,高原东部下沉运动在东侧聚集水汽,造成

相对湿度自东南向西北递减,城市化的扩建使得相对湿度大值区逐渐西扩北上,盆地中心干岛程度加深,这之前城市干岛研究一致。白天相对湿度差较大,相对湿度最高可达80%,高原主体区域与盆地中北部与东南侧相对湿度差可达40%以上,夜晚相对湿度显著增大且范围扩张,最大值可达90%以上,小值区仅分布于盆地西部和东北部地区,且范围较小。

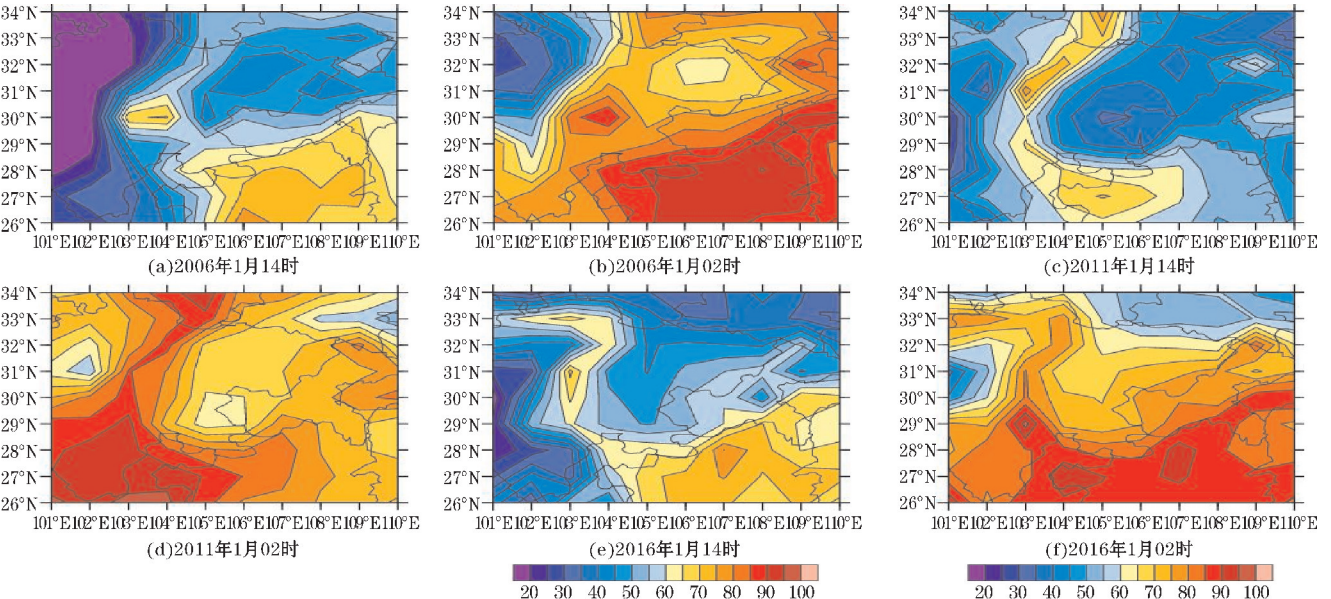


图6 四川盆地及其附近地区相对湿度昼夜空间分布图

由盆地边界层高度昼夜分布(图7)可知,在高原1500 m以上区域和盆地之间形成一条显著边界区,与图6相对湿度分布相反,白天边界层高度呈现高原高盆地低,城市化进程下盆地中心边界层高度逐渐降低,但不明显,与前人的研究稍有不同,可能与当时的天气

背景有关,最高值出现在2006年1月可达2000 m以上,盆地内边界层高度在600~1000 m,盆地东南部相对湿度大值区对应着边界层高度较低,夜晚边界层高度大范围下降至300 m以下,2016年1月盆地周围边界层高度降至200 m以下。

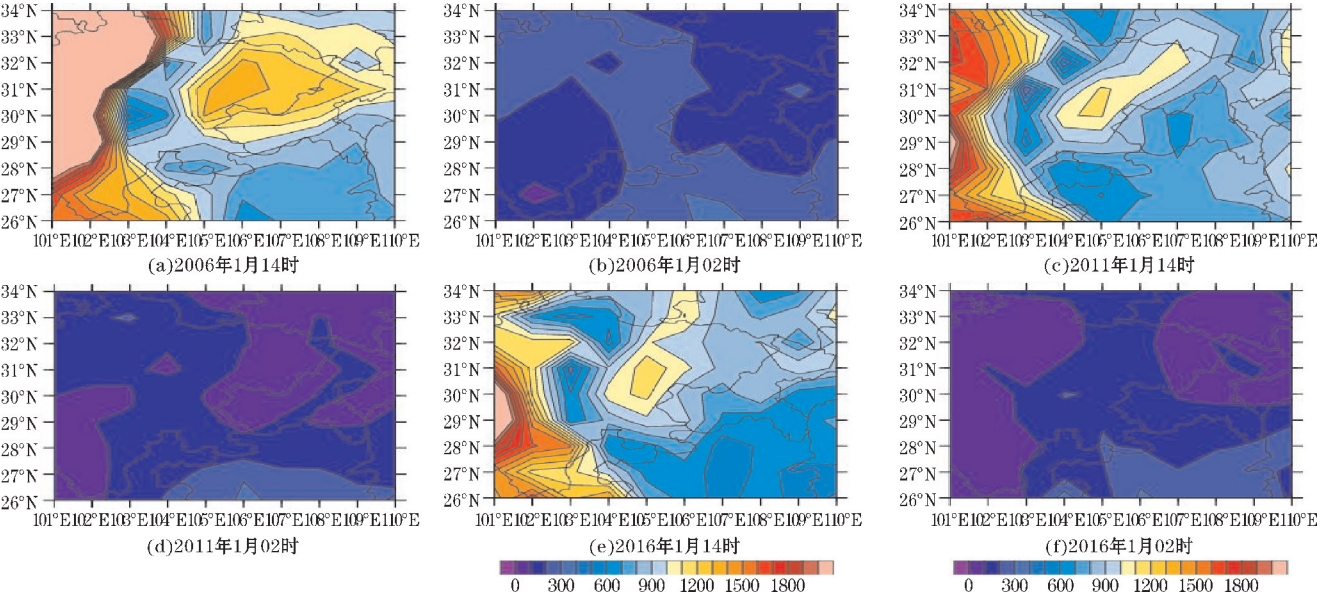


图7 四川盆地及其附近地区边界层高度昼夜空间分布图

2.2.3 涡度场的昼夜变化特征分析

盆地绝对涡度沿30°N的经向昼夜空间剖面(图8),与月平均趋势(图略)保持一致,绝对涡度为正,对流层中高层大于低层,表现为自下而上一致的辐合运

动,低层盆地辐合强度大于高原,500 hPa以下绝对涡度较小,辐合作用较弱,城市化进程下绝对涡度增大,对应着垂直运动加剧。夜晚高层辐合作用增强,有利于产生下沉运动,与垂直风速在夜晚小于0保持一致。

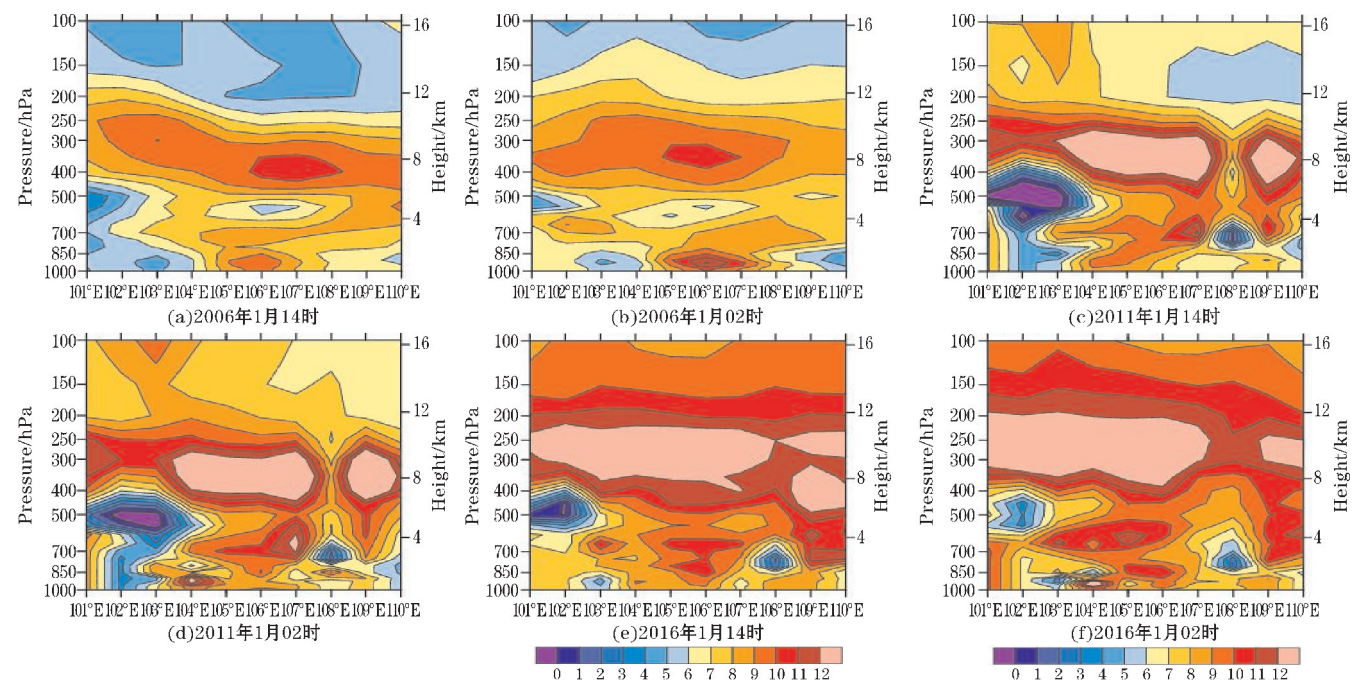


图8 四川盆地及其附近地区绝对涡度沿 30°N 的经向昼夜空间剖面图

3 结论与讨论

对四川盆地城市化进程下的 3 个代表阶段(2005/2006、2010/2011、2015/2016 年)的冬季局地环流的城市化和昼夜变化特征进行了对比分析,得出结论如下:

(1)冬季四川盆地爬流运动占主导,城市化进程下,受城市建面阻挡绕流和爬流运动减弱,水平风向风速辐合带减弱至消失,经向垂直运动加强至 50 hPa/s 以上;夜晚爬流分量弱于白天,高原附近有下坡气流,对山谷风形成有积极作用。

(2)白天相对湿度和边界层高度在高原与盆地间有显著差异,相对湿度西低东高,盆地中心形成区域性城市干岛,边界层高度则相反,城市化进程下湿度自东南向西北移动,盆地中心干岛加深、边界层高度变化不显著;夜晚,盆地相对湿度显著增加至 80% 以上,边界层高度降至 300 m 以下。

(3)盆地内绝对涡度为正,且对流层高层大于低层,低层盆地辐合强度大于高原,城市化进程下绝对涡度增大,夜晚高层辐合作用增强,有利于产生下沉运动。

虽对城市化进程代表时间段内的局地环流差异进行了对比分析,但由于观测资料并未剔除大尺度环流背景影响,所以无法定量分析这种环流差异是由于城市化进程下土地利用类型变化还是大尺度环流背景场改变而引起。因此,为了定量研究这种差异的形成原因或给出不同影响因子的贡献度,下一步工作可以结合中尺度预报模式,通过敏感性实验,对比不同城市化进程阶段下垫面变化和相同下垫面情况不同初始场之间所带来的盆地局地环流差异,从而进一步了解城市化对盆地冬季局地环流的影响机制。

致谢:感谢成都信息工程大学人才引进项目(KYTZ201727)对本文的资助

参考文献:

- [1] 侯路瑶. 城市建成因素对于城市气候影响[D]. 上海:华东师范大学,2017.
- [2] 任春艳,吴殿廷,董锁成. 西北地区城市化对城市气候环境的影响[J]. 地理研究,2006(2):233-241.
- [3] 朱焱,刘红年,沈建,等. 苏州城市热岛对污染扩散的影响[J]. 高原气象,2016,35(6):1584-1594.
- [4] 刘树华,刘振鑫,马雁军,等. 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[J]. 前沿科学,2008,2(4):61-74.
- [5] 黄义,范绍佳. 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[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学、医学版),2009,30(1):78-92.
- [6] 郑祚芳,任国玉,高华. 北京地区局地环流观测分析[J]. 气象,2018,44(3):425-433.
- [7] 鞠丽霞,王勤耕,张美根,等. 济南市城市热岛和山谷风环流的模拟研究[J]. 气候与环境研究,2003,8(4):467-474.
- [8] Ekhardt E. Dela structure thermiquedel atmosphere dans la montagne (On thermal structure of the mountain atmosphere) [J]. La Meteorology, 1948, 4(9):3-26.
- [9] Zardi D, Whiteman C D. Diurnal mountain wind systems [M]. Mountain Weather Research and Forecasting. Springer Netherlands, 2013:35-119.
- [10] 李斐,李建平,李艳杰,等. 青藏高原绕流和爬流的气候学特征[J]. 大气科学,2012,36(6):1236-1252.
- [11] 邹捍,周立波,马舒坡,等. 珠穆朗玛峰北坡局地环流日变化的观测研究[J]. 高原气象,

- 2007,26(6):1123-1140.
- [12] Zhang Y C, Sun J H, Fu S M. Impacts of diurnal variation of mountain-plain solenoid circulations on precipitation and vortex east of the Tibetan Plateau during the Mei-Yu season[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(1):139-153.
- [13] 李维亮, 刘洪利, 周秀骥, 等. 长江三角洲城市热岛与太湖对局地环流影响的分析研究[J]. *中国科学:地球科学*, 2003, 33(2):97-104.
- [14] 孙永, 王咏薇, 高阳华, 等. 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*, 2019, 42(2):122-134.
- [15] 席世平, 寿绍文, 郑世林, 等. 复杂地形下山谷风的数值模拟[J]. *气象与环境科学*, 2007, 30(3):41-44.
- [16] 王腾蛟, 张镭, 张博凯, 等. 城市下垫面对河谷城市兰州冬季热岛效应及边界层结构的影响[J]. *气象学报*, 2013(6):1-5.
- [17] 高艳红, 吕世华. 非均匀下垫面局地气候效应的数值模拟[J]. *高原气象*, 2001, 20(4):354-361.
- [18] Lin C Y, chen F, Huang J C, et al. Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(22):5635-5649.
- [19] 陈玉蓉, 宋美洋, 侯劲禹, 等. 高原和盆地间山谷风对四川霾日变化的影响分析[J]. *成都信息工程大学学报*, 2019(4):443-448.
- [20] 孙海燕, 梅再美. 贵州山区山谷地形大气边界层夏季风温廓线结构特征分析[J]. *陕西气象*, 2008(4):7-10.
- [21] 李晓敏, 曾胜兰. 成都、重庆城市热岛效应特征对比[J]. *气象科技*, 2015(5):118-127.
- [22] 程志刚, 杨欣悦, 孙晨, 等. 成都地区夏季城市热岛变化及其与城市发展的关系[J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(4):322-331.
- [23] 但尚铭, 吴吉, 但玻, 等. 四川盆地中小城市的热岛效应演变趋势初析[C]. *中国气象学会年会*, 2010.
- [24] 王谦谦, 钱永甫. 青藏高原和洛矶山脉对夏季气象场日变化影响的对比分析:(二)水平和垂直流场[J]. *高原气象*, 1983(1):18-31.
- [25] 田越, 苗峻峰. 中国地区山谷风研究进展[J]. *气象科技*, 2019, 47(1):43-53.
- [26] 伍见军. 重庆热环境特征及局地环流对其影响的模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2013.
- [27] 寿亦莹, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望[J]. *气象学报*, 2012, 70(3):338-353.
- [28] 钱永甫, 颜宏, 王谦谦, 等. 行星大气中地形效应的数值研究.[M]. 北京:科学出版社, 1988.
- [29] 陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. *地理学报*, 2009, 64(4):387-398.
- [30] Trenberth K E, Chen S C. 1988, Planetary waves kinematically forced by Himalayan orography[J]. *J. Atmos. Sci*, 45(20):2934-2948.
- [31] 程志刚, 孙晨, 毛晓亮, 等. 城市化对成都地区夏季气候变化影响的数值模拟研究[J]. *成都信息工程大学学报*, 2016, 31(4):386-393.

Analysis of the Difference at Day and Night Local Circulation in Winter of Sichuan Basin under the Process of Urbanization

CHEN Xiaoxiao, CHENG Zhigang, ZHANG Yueyue
(Chengdu University of Information and Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to study the differences of local circulation in the Sichuan Basin in different urbanization stages in winter. This paper selects the daily reanalysis data of FNL in the three representative periods of the urbanization process of Sichuan Basin in the winter of 2005/2006, 2010/2011 and 2015/2016 (Represented by January data in the following year), the statistical analysis methods of weather are used to compare the characteristics of day and night changes of urbanization in the local circulation of the basin in winter. The results show that the flow over movement is dominant in the winter of Sichuan Basin. Under the urbanization process, the flow over component and the horizontal wind are weakened, and the vertical movement is strengthened to 50 hPa/s or more; The flow over component has a positive effect on the formation of the mountain-valley wind. There are Significant differences of humidity between the plateau and the basin, the relative humidity in the east is higher than that in the west. At night, the relative humidity of the basin is significantly increased, but the height of the boundary layer is opposite. Under the process of urbanization, the dry island in the center of the basin is deepened and the height of the boundary layer is not obvious. (3) Absolute vorticity is positive in the basin, and the upper and middle troposphere are larger than the lower. The absolute vorticity increases under the urbanization, and the convergence of the higher level at night is enhanced, which is conducive to the falling movement.

Keywords: atmospheric sciences; climate change and numerical simulation; Sichuan Basin; urbanization; local circulation; the changes of day and night