

文章编号: 2096-1618(2016)06-0629-08

基于 WRF 模式的成都地区热岛效应的模拟研究

李肇洁, 曾胜兰

(成都信息工程大学高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

摘要:为探讨成都地区热岛效应的形成机制,利用 WRF 模式对 2008 年 7 月 5~6 日成都地区的热岛效应进行了模拟,通过对城市下垫面与非城市下垫面 2 m 高温、能量及其辐射的对比分析来揭示成都地区热岛效应的时空特征及形成机制。结果表明:成都地区存在 2℃ 左右的热岛效应;城市下垫面的存在改变了成都地区能量平衡,潜热通量的减少导致能量以感热的形式加热大气,且城市下垫面热容量的减少使得感热通量与土壤热通量增加,导致城市地区温度高于郊县农田地区;城市地区地表反照率的减少,使得城市地区反射出去的短波辐射减少,更多的能量汇集,且夜晚较高的向上长波辐射为辐射冷却提供能量,从而导致城市地区夜晚温度降低速度低于农田,因此,白天升温速率大于农田地区。

关键词:气象学;数值模拟;WRF;热岛效应;地表能量平衡

中图分类号:P468.0⁺21

文献标志码:A

0 引言

伴随着城市化进程的加剧,城市下垫面与农田下垫面的差异越来越强烈,反射率的改变,使用不透水材料和排水管道,加上城市建筑物对辐射的吸收以及城市人为热的排放,这些都会引起地表能量平衡与非城市下垫面地区有很大的差异,也就会引起城市气候的变异。

19 世纪初 Lake Howard^[1] 提出“城市热岛”的概念,很多大型城市都观测到这种现象^[2-4],城市化带来的城市热环境的改变一直都是关注的焦点。近些年来,随着全球经济的迅猛发展,城市化进程伴随着经济的增长而日趋增长,导致城市人口急剧增加,人为活动的发展如工业产业的密集集中、商业产业和居民生活等都对下垫面土壤特性的产生了巨大的影响,其主要影响有两个方面:(1)下垫面的影响。城市与郊区主要的区别在于下垫面反照率、发射率、导热率的等物理特性的不同,原来的自然植被被水泥、混凝土等坚硬的不透水材料代替,且城市高楼及其街道布局复杂,这就极大地影响了城市地区湍流运动、辐射、物质的交换过程。(2)较高人为热的释放。由于工业生产的力度加大,燃烧能源释放大量人为热,导致城市地区能量的收入大于郊区能量的收入^[5]。反过来,土壤特性的改变,直接导致地气交换过程与地表能量的输送,从而影响天气、气候和生态问题^[6-8]。

21 世纪以后,中尺度模式有了飞速的发展及其应用,促进人们对城市热岛效应的研究,包括如 RAMS^[9]、MM5^[10]、WRF(Weather Research & Forecasting Model)^[11] 中尺度数值模式在国内外比较常见。仲跻芹等^[12]利用区域大气模拟系统(RAMS),模拟研究北京地区边界层的热岛现象,结果表明,北京地区热岛效应有夜晚强度大于白天的特征,并且在城市平原边界层中,热岛垂直环流比较明显,而地形梯度大的地区环流不明显。郑祚芳等^[13]应用 MM5 模式,模拟 2000 年 7 月的一次高温过程,结果显示,MM5 模式成功模拟了此次高温过程。蒙伟光等^[14]利用 WRF/UCM,对广州地区的热岛现象进行模拟,并利用高精度 GIS 数据作为下垫面进行敏感性试验,综合分析广州地区热岛效应的时空特征及其对能量的影响。麦建华等^[15]利用 WRF 中 UCM 冠层模式对珠江三角洲地区的热岛效应进行模拟,利用对人为热敏感性试验,分析出潜热、感热通量在城市地区的变化特征。

自西部大开发以来,成都市城市化进程加速,工业、商业以及居民生活对城市气候的影响越来越明显,城市热岛作为人类生产生活影响的产物,对人们的生活有着很大的危害,已有很多研究用不同方法,对不同时段的热岛效应从时间与空间上做了深入研究,为研究成都地区热岛效应形成机制奠定基础。石凤云等^[16]通过对 1961~1984 年成都地区平均气温与年平均最低气温差做了统计分析,研究表明,成都市中心地区温度与温江地区最低温度年平均差由 1960 年的 -0.1℃ 增加到 1984 年的 0.4℃ 左右,表明城市的发展引起城市地区温度升高幅度高于郊县地区,成都地区存在明显的热岛效应。曾胜兰^[17]利用 MODIS 数

收稿日期:2016-04-26

基金项目:自然科学基金青年科学基金资助项目(41505122);四川省科技厅资助项目(2015GZ0238);四川省教育厅资助项目(13ZB0075);四川省环境保护科技重大专项资助项目(2013HBZX01)

据,反演2002年和2012年成都地区地表温度,研究表明,成都地区热岛夜间热岛强、夏季强于冬季的特点。肖丹等^[18]利用中尺度WRF模式,利用高精度下垫面模拟成都地区热岛效应的特征,研究表明,城市下垫面改变地表蒸发及水汽通量,并改变能量的平衡。研究在以往研究成果的基础上,利用中尺度WRF模式模拟的方法,探讨成都市夏季热岛效应的时空特征及其能量平衡。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

成都市位于四川省中部,介于东经 $102^{\circ}54' \sim 104^{\circ}53'$ 和北纬 $30^{\circ}05' \sim 31^{\circ}26'$,全市东西长192 km,南北宽166 km,总面积约12390 km²,其中耕田面积约648万亩。由于成都市东西高低悬殊,热量随着海拔的升高急剧减少,导致成都地区有两种同时存在的气候格局—东暖西凉。成都市还具有“冬湿冷,春早”的气候特征,年平均气温在16℃左右,最冷月份(1月)平均气温为5℃左右,低于0℃的天气集中在12月中下旬到次年的1月中旬,极少数出现1月中下旬。另外,成都市冬春雨水少,夏秋多雨,雨量丰富,年平均降水量为900~1300 mm,且降水年际变化不大。还有成都地区晴朗天气少,云量多,日照时间短,年平均日照数为1042~1412 h。

从1978年中国实施改革开放政策以后,成都市城市化进程一直保持稳定、快速的发展,到2007年,城市化率已经达到64.85%。在1976~2009年,城市人口比重提高了34.47%,城区范围不断扩张,中心城区建成区面积由1980年的60 km²扩展至2009年的439.59 km²^[19],到2014年末,常住人口1365.3万人,全市户籍人口1130.2万人。人口的迅速增长与工业化进程的加快,不仅使成都地区下垫面物理性质发生的巨大的改变,而且导致城市地区释放大量的热,从而导致城市热岛效应的形成。

1.2 模式和实验设计

研究采用WRF-v3.4版本,使用两重嵌套的方式,静态地形数据分辨率为30 s、30 s,外层模拟中心为 30.67°N , 104.06°E ,内层模拟中心为 30.54°N , 104.01°E ,内、外分辨率分别为1 km、5 km,外层网格数为 86×100 ,内层网格数为 126×176 ,模拟时间段为2008年7月5日00:00~6日18:00时,每隔1小时输出一个结果,垂直层采用31层,顶层气压为50 hPa,部

分参数化方案:微物理方案为WSM3(WRF Single-Moment 3-class scheme),长波辐射方案为rrtm,短波辐射方案为Dudhia,路面过程为Noah-UCM,近地层方案为MYNN,边界层方案为MYNN,城市下垫面方案采用UCM(Single-Layer, Urban Canopy Model)。

模拟使用的下垫面数据为美国地质勘探调查局USGS的30 s分辨率数据,使用NCEP/NCAR的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的全球6小时1次的FNL在分析数据作为初始场和边界场,选取(如图1)包括成都市($102^{\circ}54' \text{E} \sim 104^{\circ}53' \text{E}$, $30^{\circ}05' \text{N} \sim 31^{\circ}26' \text{N}$)在内的区域作为主要研究区域。

1.3 研究方法

模拟所用时间为世界时间(UTC),分析内容所用时间为当地时间(L.T.)。

运用热岛强度UHI探讨成都地区热岛效应的时空特征,并结合成都地区2 m高温度的空间分布,说明2008年7月5~6日成都地区热岛效应的局地分布及其强度。

定义城市站点2 m温度与农田站点2 m温度二者的差值为热岛强度。故热岛强度公式为

$$VHI = T_{\text{urban}} - T_{\text{natural}} \quad (1)$$

地表能量平衡与辐射平衡是陆面过程和陆-气相互作用的基础,描述了地表与大气和能量交换的过程,二者是联系陆面与大气能量和物质的枢纽。这一关系的存在,说明地表接收到的能量通过湍流输送、辐射和热传导等进行重新分配。陆地表面将接收到的太阳短波辐射通过复杂的物理作用进行耗散,并为其上部的大气中发生的能量水分交换过程提供下边界驱动条件,由此可见,对于城市热岛现象形成原因的分析,最终都归结为对地表能量平衡的分析。通过对比分析城市下垫面站点与农田下垫面站点各能量分量及其辐射分量的差异,进而通过对能量平衡的分析来说明成都地区热岛效应的形成机制。

地表能量过程是对地表从辐射过程中获得的能量的分配过程^[20],其所能利用的能量通过加热大气、加热土壤以及蒸发水汽的方式耗散掉,这3种形式的能量分别称为感热、土壤热通量、潜热通量,对比分析下垫面性质的改变对感热、潜热及土壤热通量的影响,从而能够清楚的了解城市下垫面能量的分配方式。辐射能量过程是能量获得的过程,辐射包括长波辐射与短波辐射,通过分析城市下垫面与农田下垫面辐射能量的差异,从而能够了解不同下垫面情况下储能的差异,进而可以综合上述分析了解城市化对能量平衡的影响。

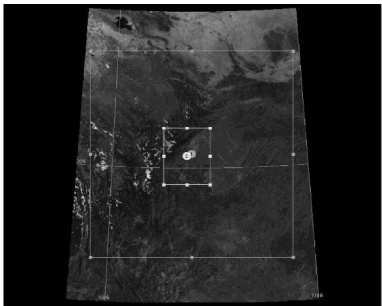


图1 模拟区域嵌套

2 模式结果分析

2.1 城市热岛时空特征

文中选择30.67 °N,104.06 °E作为城市下垫面站点,30.25 °N,104.06 °E作为农田下垫面站点进行分析。

成都地区有明显的热岛效应,热岛效应峰值在夜晚2时达到最大,最大值超过5℃,最小值出现在6日上午10时,且夜晚的平均热岛强度大于白天,因此,成都地区热岛效应有白天强度小,夜晚强度大的特征(图2)。

由图3可知,成都市区(30.67 °N,104.06 °E)平均温度在28℃,而市区东部温度达29℃,高出周边温度2℃,由此可见,成都地区有明显的热岛效应存在,且热岛强度在2℃左右。

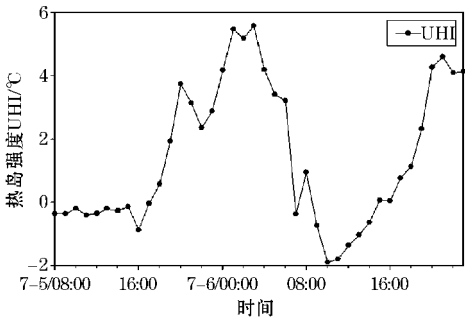


图2 成都地区热岛强度日变化趋势

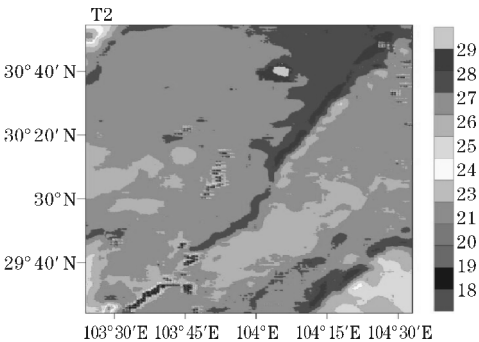


图3 成都地区2 m 高平均温度分布(单位:℃)

2.2 不同下垫面能量特征差异

2.2.1 潜热通量

由图4可知,成都地区水汽通量呈现出日变化特征,夜间城市下垫面站点与农田城市下垫面站点的水汽通量均为0,白天城市下垫面站点水汽通量远小于农田城市下垫面站点,最大差值在14:00接近,这就意味着在单位面积上和单位时间上,城市地区向大气输送的水分明显少于非城市地区。引起这种现象的原因是城市冠层下垫面不透水地表的增加的缘故,不透水地表的增加阻碍了地表水汽向大气输送,导致水汽通量大幅度减少。据研究^[21],从1980s末开始,成都地区相对湿度开始减少,但是,在进入1990s开始,成都市城市区域水汽减少幅度超过郊县地区,城市干岛越来越明显。因此,在城市地区,水汽通量小于农田地区,从量级来看,成都地区城市下垫面水汽通量比农田下垫面要小,且相差一个量级。

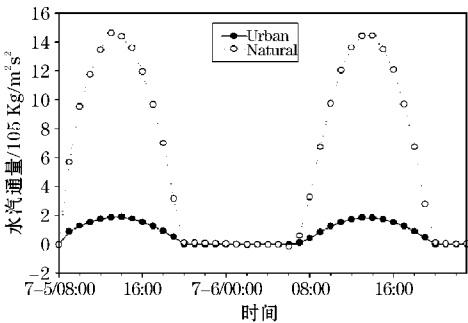


图4 城市下垫面与农田下垫面水汽通量
(Urban 为城市站,Natural 为农田站)

对于成都地区潜热通量而言(图5),感热通量也呈现出日变化的特征,不论城市站还是农田站,夜晚潜热通量均为0,到北京时间早上8时,随着地表能量的增大,感热通量开始增大,到14时到达最大,城市站峰值达到了350,而农田下垫面站峰值只接近50,随后,潜热通量开始减少,到晚上20时,减少到0。

在夜晚(图6a),成都区域内的潜热通量基本为0,在城市范围内,潜热通量小于0,但基本维持在-5以内,且持续时间较短,这就说明,水汽的输送主要是从地表向大气传输;在白天(图6b),城市区域与农田区域差别较大,城市区域维持在40,而农田区域达到了400。成都地区白天城市下垫面站点的水汽通量的输送远小于非城市下垫面站(图4),因此,白天城市下垫面潜热通量远小于非城市下垫面,且农田植被下垫面含水量高于城市下垫面,故可供蒸发的水汽小于农田地区,这也导致了城市地区潜热通量小于农田地区。

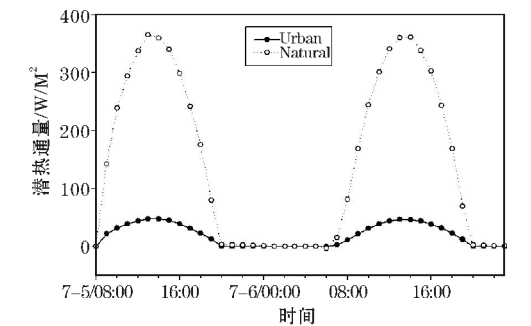
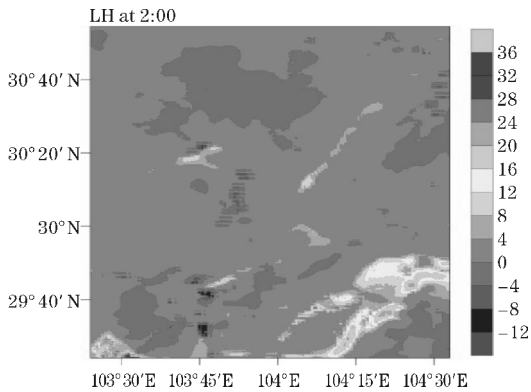
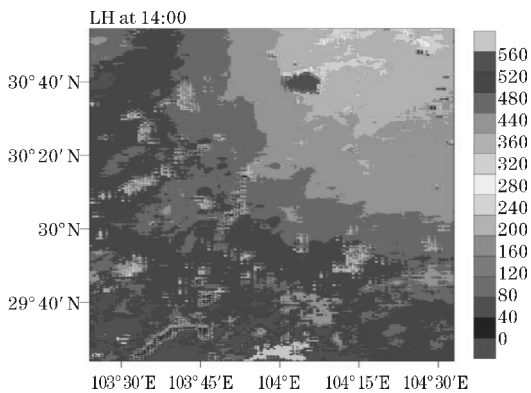


图 5 城市下垫面与农田下垫面潜热通量
(Urban 为城市站, Natural 为农田站)



(a) 夜晚



(b) 白天

图 6 夜晚和白天潜热通量空间分布 (W/M^2)

2.2.2 感热通量

由图 7 可知,成都地区感热通量与潜热通量一样,都呈现出日变化特征,且不论是城市还是农田下垫面,夜晚的感热通量基本为 0,但是,农田下垫面站在夜晚的感热通量存在负值,这就说明夜晚存在大气向地面传输能量,这部分能量由地表通过长波辐射释放出去^[22],从而引起大气温度降低。早晨 08:00 时以后,城市与农田地区感热通量同时增加,到中午 12:00 时,农田下垫面站的感热通量达到最大,峰值在 250 左右,而城市下垫面站的感热通量到下午 14 时达到最大,滞后于农田下垫面,峰值达到了 350,由此可见,白天城

市下垫面用于加热大气的能量多于农田下垫面,从而导致了白天城市区域内温度高于农田地区。

由图 8 可知,城市区域与农田区域内的感热通量有明显的差异,在夜晚,城市区域内有正的感热通量来加热大气,然而在农田区域内,负的感热通量通过长波辐射释放出去,使得该地区温度降低。在白天,城市区域内的感热通量大于农田区域,使得较多的能量用来加热大气,这就使得城市区域内的温度高于郊县区域。

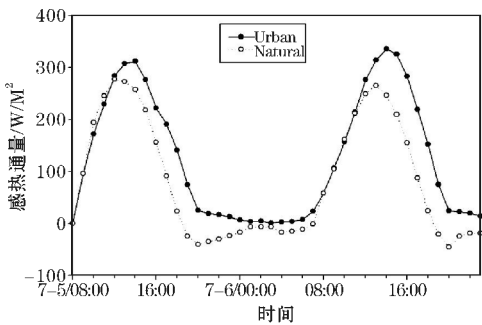
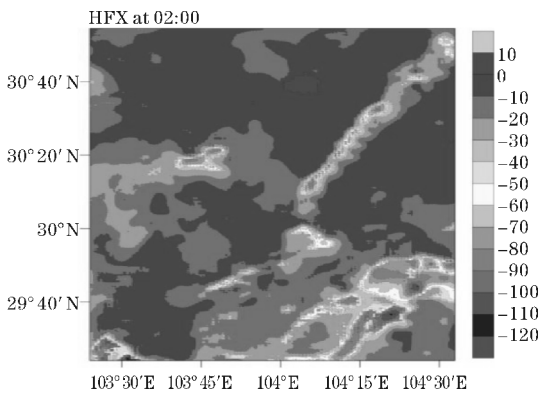
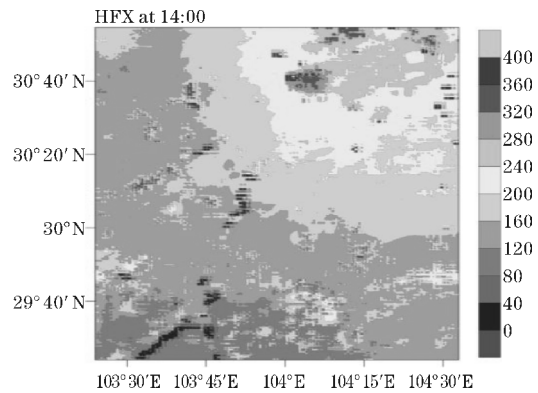


图 7 城市下垫面与农田下垫面感热通量
(Urban 为城市站, Natural 为农田站)



(a) 夜晚



(b) 白天

图 8 夜晚和白天潜热通量空间分布 (W/M^2)

2.2.3 土壤热通量

图 9 为成都地区城市站点与农田站点下垫面土壤热通量的随时间的趋势,土壤热通量同样呈现出日变

化特征,其夜晚土壤热通量均为负值,农田下垫面站点夜间的土壤热通量值维持在 $0 \sim -50$,城市站点,夜间的土壤热通量 -100 。白天的土壤热通量均为正值,造成08:00时以后,城市站点与农田站点下垫面的土壤热通量同时增加,但城市站点增长幅度大于农田站,城市站到12:00时达到最大,峰值超过250,而农田站滞后城市站一个小时达到最大,峰值接近50,峰值最大相差200。白天城市站点土壤热通量高于农田站点的原因是城市下垫面以水泥、混凝土为主,与农田下垫面相比,较低的反照率使得城市下垫面吸收较多的能量,故城市下垫面土壤热通量大于农田地区。

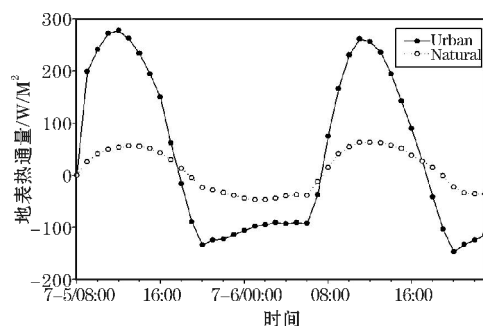


图9 城市站点与农田站点下垫面土壤热通量
(Urban为城市站,Natural为农田站)

2.3 不同下垫面辐射特征差异

1987年,Oke提出城市热岛形成的主要原因之一是城市下垫面的改变,影响城市可视因子的变化,从而引起辐射场发生改变。文中针对辐射能量,做下面的研究分析。

2.3.1 长波辐射

从图10可知,在没有其他因素(如云)的影响情况下,城市站点与农田下垫面站点对于长波辐射的吸收没有太大的差别,日变化维持在 $340 \sim 420$,向下的长波辐射呈现出日变化特征,峰值维持在下午17:00~18:00时,但是,这与Oke^[23]提出的城市冠层对长波辐射的截获作用相矛盾,模式中如何描述城市冠层对长波辐射的截获需要进一步的研究。但是城市下垫面大部分时间内向上的长波辐射大于农田下垫面,到夜晚二者相差最大,峰值差最大为50。

因此,城市下垫面辐射冷却效果大于农田下垫面地区,既在白天,净长波辐射对城市下垫面区域的加热比农田地区要小,但是在晚上,辐射冷却要比农田地区要大(图11)。

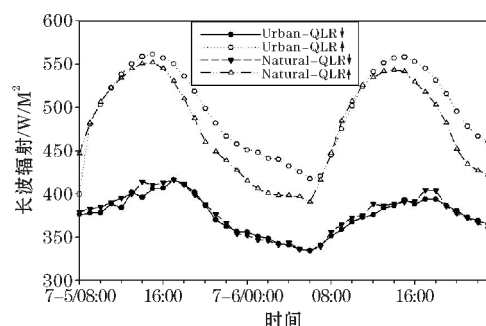


图10 城市站点与农田站点下垫面长波辐射

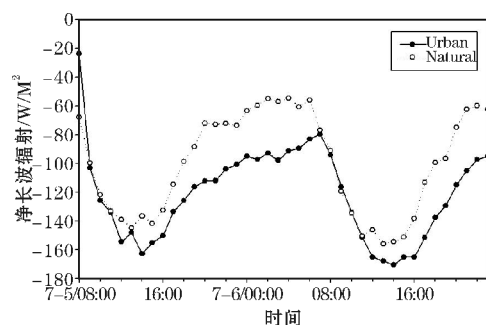


图11 城市站与农田站下垫面净长波辐射
(Urban为城市,Natural为农田)

2.3.2 短波辐射(QSR)

图12是城市下垫面站点与农田下垫面站点短波辐射随时间变化图,可以看出,地面吸收的短波辐射在夜晚为0,这是因为短波辐射是波长小于3的电磁辐射,然而太阳辐射波段的能量主要集中在短波波段,故短波辐射的变化与太阳有关,且短波辐射的大小与底层1000 m左右大气层温度有关,因此,夜晚短波辐射为0。从早晨08:00开始,向下短波辐射逐渐增大,到下午15:00时达到最大值,向下长波辐射最大值大于1000。

从整体来看,在没有其他因素影响的情况下,城市区域与农田去白天吸收的短波辐射基本一致,这就说明城市冠层对短波辐射吸收与农田区域基本一致,城市冠层对短波辐射的截获作用不是很明显。

对于向上短波辐射来讲,非城市地区反射出去的短波辐射大于城市地区,可见城市冠层下垫面对短波辐射的吸收大于非城市地区,对短波辐射的反射差异主要在中午12:00左右最为明显,既城市冠层对向上长波辐射有截获作用。城市区域对短波辐射的截获作用从城市与农田下垫面的地表反照率(图13)上就有了很好的说明,城市下垫面反照率的值在0.17左右,然而农田地区反照率在0.19附近,较大的反照率使得城市地区获得的短波辐射多于农田地区。

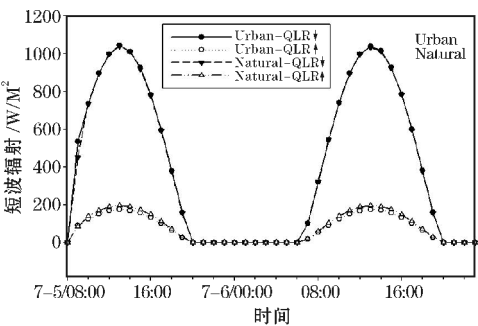


图 12 城市站点与农田站点下垫面短波辐射

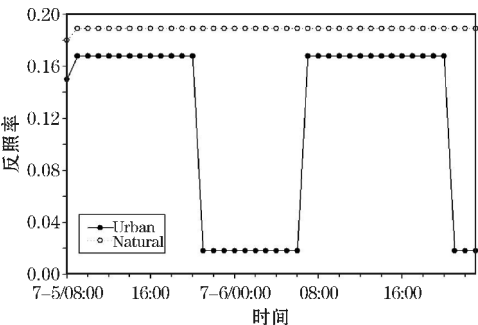


图 13 城市下垫面与农田下垫面反照率
(Urban 是城市站, Natural 是农田站)

2.4 能量平衡

经对城市地区与农田地区地表能量与辐射差异的分析,发现城市下垫面的改变对地表能量与辐射均产生了很大的影响,这必将影响地—气的能量交换,从而导致地表能量平衡的改变。

地表能量平衡可表示为

$$Q^* = Q_{SH} + Q_{LH} + Q_{GH} \tag{2}$$

(2)式中, Q^* 为净辐射通量, Q_{SH} 为地表感热通量, Q_{LH} 为地表潜热通量, Q_{GH} 为土壤热通量。对于地表净辐射通量,可以表示为

$$Q^* = Q_{SR}^* + Q_{LR}^* = (Q_{SR\downarrow} - Q_{SR\uparrow}) + (Q_{LR\downarrow} - Q_{LR\uparrow}) \tag{3}$$

式中, Q_{SR}^* 、 Q_{LR}^* 分别代表短波辐射通量和长波辐射通量, $Q_{SR\downarrow}$ 、 $Q_{SR\uparrow}$ 分别代表了向下、向上短波辐射通量, $Q_{LR\downarrow}$ 、 $Q_{LR\uparrow}$ 分别代表向下、向上长波辐射通量值。

图 14 为成都地区城市地区 7 月 5 日 08:00~6 日 23:00 城市下垫面能量各个分量随时间的演变,其中正值为能量收入,负值为能量支出。可以看出夜晚能量的主要来源是土壤热通量 GRDFLX,虽然感热通量 HFX 在夜晚也释放能量,但是其值太小,所释放能量少,所以,土壤热通量是夜晚能量的主要来源。在夜晚,由于地表辐射能量中向上长波辐射大于农田区域(图 10),土壤深层的能量则传向地表,从而导致夜间城市区域地表温度高于农田区域。同时,夜间潜热通量释放的能量由地面经向上长波辐射释放,从而导致

城市区域内夜间温度高于农田。

白天,地表吸收的短波辐射(SWDOWN)能量成为能量的主要来源,而潜热、感热以及土壤热通量表现为支出,成为能汇。由图 12 知,由于城市地区下垫面反照率低的缘故,城市下垫面能够获得的短波辐射大于农田地区,更多的能源用来进行感热、潜热以及土壤热通量能量交换的进行,从而导致白天城市区域内温度高于农田地区。

通过对鲍恩比 r (感热通量/潜热通量)的计算,如图 15 所示,发现潜热通量在城市区域内所占的比重值大于农田地区,且城市下垫面站点的 $r>1$,农田站的 $r<1$,这就说明在城市下垫面,感热通量占主要地位,而对于农田下垫面,潜热通量占主导地位。这是因为城市下垫面建筑物侧壁及其屋顶对短波辐射有多次折叠吸收储能的作用,这就使得地表降温速度慢,这部分热量在夜晚为潜热提供能量,所以城市区域的感热比重一直高于农田地区。

与农田地区相比,城市地区水汽的缺乏(如图 14)使得蒸腾作用减小,潜热减少,这就使得增加的部分能量以感热的形式对大气进行加热,其余部分用于增加向下土壤热通量。

综上所述,由于城市化进程改变了地表覆盖性质的改变,导致了地表能量各分量与辐射能量均发生改变,导致地表能量平衡结构发生了变化,从而引起城市热岛效应。

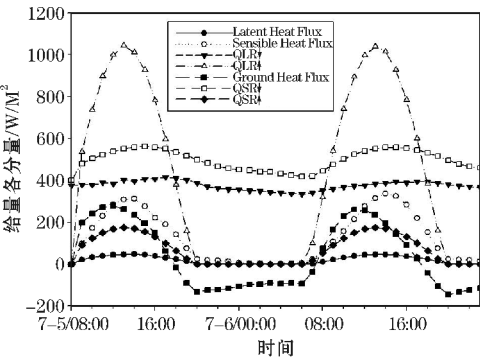


图 14 城市下垫面能量各分量随时间分布

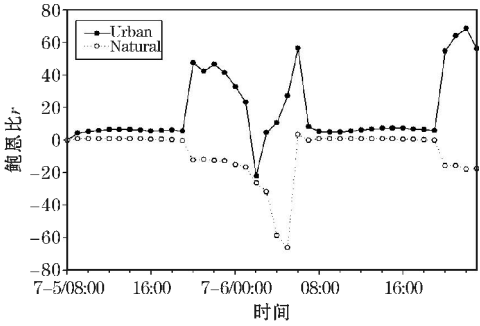


图 15 城市下垫面站点与农田下垫面站点鲍恩比 r
(Urban 为城市站, Natural 为农田站)

3 结束语

利用中尺度WRF模式模拟2008年成都地区7月5~6日的热岛效应,通过对城市下垫面与非城市下垫面2 m高温、辐射及其能量的对比,重点分析成都地区热岛效应的时空特征以及能量平衡的变化,得到以下结论:

(1)城市化的发展改变下垫面类型,从而引起近地面温度升高,且夜间温度升高幅度大于白天,夏季成都地区城市下垫面比郊县地区农田温度高出2℃左右。

(2)城市下垫面的改变对地表能量及其平衡产生了影响。由于城市冠层下垫面不透水性的缘故,使城市区域内水汽通量及其潜热通量大幅度减少,这就使得城市区域内的能量大部分均以感热的形式加热大气,且城市下垫面热容量小,从而导致城市区域受热温度增加较快,地表传输的能量较多,使得城市区域内的感热通量及土壤热通量增加,进而引起城市区域内的温度升高,大于郊县地区。

(3)城市下垫面的改变对辐射产生了影响。在夜晚,城市下垫面辐射出去的长波辐射大于郊县地区,这部分能量为辐射冷却提供了能量,从而使得城市地区夜晚温度下降速度比郊县地区慢,且城市地区较小的反照率使得城市区域辐射出去的短波辐射少于郊县地区,导致城市属于高储热地区,从而引起城市区域内感热通量的增大,最终导致城市温度高于郊县地区。

致谢:感谢成都信息工程大学引进人才项目(KYTZ201429)对本文的资助

参考文献:

- [1] Howard L. deduced from meteorological observations made in the metropolis and atvarious places around Harvey and Darton, J. and A. Arch, Longman, Hatchard, S. Higjiley [M]. London: The climate of London, 1833.
- [2] Renou E J. Instructions meteorologiques [M]. 1855.
- [3] Manley G. On the frequency of snowfall in metropolitan England [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1958, 84(359): 70-72.
- [4] Bornstein, Robert D. Observations of the urban heat island effect in New York City [J]. J. Appl. Meteor., 1968, 7: 575-582.
- [5] 黄燕燕, 万齐林, 袁金南, 等. 城市冠层过程的研究与进展 [J]. 热带气象学报, 2006, 22(3): 290-296.
- [6] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. An urban parameterization for a global climate model. Part I: Formulation and evaluation for two cities [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(4): 1038-1060.
- [7] Grimmond C S B, Blackett M, Best M J, et al. The international urban energy balance models comparison project: first results from phase 1 [J]. Journal of applied meteorology and climatology, 2010, 49(6): 1268-1292.
- [8] Grimmond C S B, Blackett M, Best M J, et al. Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison [J]. International journal of climatology, 2011, 31(2): 244-272.
- [9] Pielke R A, Cotton W R, Walko R L, et al. A comprehensive meteorological modeling system - RAMS [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 1992, 49(1-4): 69-91.
- [10] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth-generation Penn State [J]. NCAR mesoscale model (MM5), 1994.
- [11] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF version 2 [R]. National Center for Atmospheric Research Boulder Come soscale and Microscale Meteorologydiv, 2005.
- [12] 仲跻芹. 北京城市边界层热岛的数值模拟 [C]. 新世纪气象科技创新与大气科学发展——中国气象学会 2003 年年会“城市气象与科技奥运”分会, 2013.
- [13] 郑祚芳, 范水勇, 王迎春. 城市热岛效应对北京夏季高温的影响 [J]. 应用气象学报, 2006, (17): 48-53.
- [14] 蒙伟光, 张艳霞, 李江南, 等. WRF/UCM 在广州高温天气及城市热岛模拟研究中的应用 [J]. 热带气象学报, 2010, 26(3): 273-282.
- [15] 麦健华, 罗乃兴, 赖文锋, 等. 城市化对珠江三角洲热岛效应影响的模拟 [J]. 2011, 31(2): 187-192.
- [16] 石风云, 肖天贵. 成都市发展对气候影响的初步探讨 [J]. 成都气象学院学报, 1990, (2/3): 35-44.
- [17] 曾胜兰. 成都市城市热岛效应分析 [J]. 成都

- 信息工程学院学报,2015,30(1):96-101.
- [18] 肖丹,陈静,陈章,等.成都精细下垫面信息对城市气象影响的模拟试验[J].气象,2011,37(3):288-298.
- [19] 杨绪萍.统筹城乡背景下成都城市化发展研究[D].成都:西南财经大学,2011.
- [20] 曾剑,张强.2008年7-9月中国北方不同下垫面晴空陆面过程特征差异[J].气象学报,2012,70(4):821-836.
- [21] 郝丽萍,方之芳,李子良,等.成都市近50年气候变化特征及其热岛效应研究[D].南京:南京信息工程大学,2006.
- [22] 王成刚,孙鉴汭,胡非,等.城市水泥下垫面能量平衡特征的观测与分析[J].南京大学学报:自然科学,2007,43(7):270-279.
- [23] Oke, T R. The energetic basis of the urban heat island[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982, 108: 1-24.

The Research of Heat Island Effect in Chengdu based on WRF Model

LI Zhao-jie, ZENG Sheng-lan

(Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Univesity of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to study the formation mechanism of the urban heat island effect in Chengdu area, the heat island effect during July 5th to 6th in 2008 was simulated by using WRF model. To illustrate the spatial and temporal characteristics of heat island effect in Chengdu area and its formation mechanism, 2 m height temperature, energy and radiation above urban underlying surface were compared with that above nature underlying surface. The results showed that heat island effect in Chengdu was obvious, and the temperature difference between urban and nature area was about 2 °C. The energy balance changed because of the change of natural area into urban underlying surface. The decreasing of latent heat flux led to the change of the way to heat the atmosphere, in other words, the atmosphere was heated by sensible heat. Due to reduced thermal capacity because of urban underlying surface, sensible heat flux and soil heat flux increased, which might result in the higher temperature in city than that in suburban area. Surface albedo decreased in urban areas, which would cause the reduction of reflect shortwave radiation in urban areas, and more energy were stored in the air, meanwhile, higher upward longwave radiation at night could provide energy for radiation cooling, and it would result in the lower decreasing rate of night temperature in urban areas than that in the farmland, so the daytime heating rate was greater than that in the farmland area.

Key words: meteorology; numerical simulation; WRF; heat island effect; the surface energy balance