

合肥市城、郊气象要素及地气交换通量差异的观测研究

桂煜,袁仁民¹,吴晓庆²,陶小平³,崔延宣¹,刘豪¹

(1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026;

2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽合肥 230031;

3. 中国科学技术大学物理学院, 安徽合肥 230026)

摘要: 利用2013年1月5日~10月10日城、郊自动气象站和涡度相关系统观测数据,从气象要素、城市热岛强度、地表能量平衡三个方面定量分析了合肥市城、郊的差异. 结果表明:①四个季节夜间热岛强度总是强于白天,而白天城市热岛并不明显. 四季夜间热岛强度大小关系为冬季>秋季>春季>夏季. 冬季晴天夜间热岛强度均值达到最大值1.97℃,夏季晴天夜间热岛强度均值达到最小值0.76℃. ②城区以感热通量为能量支配的主要方式,郊区以潜热通量为能量支配的主要方式,城区日均形成不稳定层结时间比郊区长2.3 h. 城区站点四季波文比起伏较大,冬季晴天最大为8.66,秋季晴天最小为0.95,四季波文比大小关系为冬季>春季>夏季>秋季. 郊区站点四季波文比起伏较小,冬季晴天最大为1.65,秋季晴天最小为0.49.

关键词: 城市化;城市热岛;地表能量平衡;气象要素

中图分类号: P422.4 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2020.06.009

引用格式: 桂煜,袁仁民,吴晓庆,等. 合肥市城、郊气象要素及地气交换通量差异的观测研究[J]. 中国科学技术大学学报,2020,50(6):777-783.

GUI Yu, YUAN Renmin, WU Xiaoqing, et al. Experimental study on differences of meteorological elements and surface fluxes in urban and suburban Hefei[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2020,50(6):777-783.

Experimental study on differences of meteorological elements and surface fluxes in urban and suburban Hefei

GUI Yu¹, YUAN Renmin¹, WU Xiaoqing², TAO Xiaoping³, CUI Yanxuan¹, LIU Hao¹

(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

3. School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

Abstract: Based on the data collected by the automatic weather station and the eddy correlation system from the urban and suburban areas in Hefei from 5 May to 10 October, 2013, differences in the urban and suburban areas are quantitatively analyzed from three aspects: meteorological factors, urban heat island (UHI) intensity, and surface energy balance. The result shows: ① UHI in the evening is stronger than that in the daytime, but not obvious in the daytime. The order of intensity of UHI in four seasons at night is winter > autumn > spring > summer. The average value of UHI intensity at night reached the maximum of 1.97℃ on clear winter nights, and the minimum of 0.76℃ was reached on clear summer nights. ② The sensible heat flux played a major role in urban energy budget, while the latent heat flux played a major role in suburban energy budgets. The daily average time of unstable stratification in urban sites is 2.3 h longer than that in suburban areas. The Bowen ratio of the four seasons in the urban area fluctuated greatly, reaching the maximum of 8.66 on sunny days in winter, and the minimum of 0.95 on sunny days in autumn. The order of the Bowen ratio of four seasons in the urban area is winter > spring > summer > autumn. The Bowen ratio in the suburban area had less fluctuations in four seasons with the maximum being 1.65 on sunny days in winter and the minimum being 0.49 on sunny days in autumn.

Key words: urbanization; urban heat island; surface energy balance; meteorological elements

收稿日期: 2020-01-15; 修回日期: 2020-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(41775014, 51677175)资助.

作者简介: 桂煜,男,1993年生,硕士生. 研究方向:城市能量平衡和城市热岛. E-mail:18755172173@163.com

通讯作者: 袁仁民,博士/教授. E-mail:rmyuan@ustc.edu.cn

0 引言

城市化是人类对土地利用方式的最重要变革之一^[1-2],今天的人类正在向城市化生活过渡.1900年,全球人口中只有10%是城市居民,而现在这一比例已超过50%,并且在接下来的50年中这一数字还将继续增长^[3].城市的出现和扩大,使得密集的建筑物取代了自然的地表面,大面积的不透水人工表面(水泥、沥青等)取代了原本被植被覆盖的自然透水地表,直接影响了水文循环的全过程,并且形成了城市热岛等独特的城市气候特征.城市不均匀的下垫面等影响使得城市局地气象要素、能量和辐射平衡特征上和其他地区有很大不同.

城市热岛是指城市气温高于郊区,气温较高的城区处于气温相对较低的郊区包围之中的现象.19世纪初,Howard^[4]发现伦敦城区气温比四周郊区气温高.Manley^[5]于1958年首次提出城市热岛(urban heat island, UHI)的概念.此后,学者对不同地区的城市热岛的存在性、长期变化、形成原因,以及城市热岛所产生的影响等开展了大量的研究,取得了许多研究成果.中国的城市热岛研究起步于20世纪80年代.周明煜等^[6]指出北京冬季热岛强度最高可达6℃;杨涵涌等^[7]发现1961~2013年上海市城市气温整体呈上升趋势,达到每十年增加0.15~0.17℃;李庆祥等^[8]指出近20年深圳市增温幅度达到了每十年0.34℃.城市热岛呈现出明显的季节性变化,并且这种变化十分复杂.纪瑞鹏等^[9]利用卫星资料对沈阳等共6个城市的热岛现象进行连续监测,发现由于各自地理位置和气候的差异,同属特大综合城市的沈阳的热岛强度(5.82℃)比大连(2.61℃)强一倍多,沈阳的最大热岛强度出现在夏末秋初,大连出现在春季,抚顺、本溪的最大强度出现在初夏.

城市气候会随着地区城市化而发生巨大变化,并且这种变化对城市热岛、建筑能耗和人们的居住环境都会产生巨大的影响.地表能量交换是了解当地城市气候的关键,而地表能量平衡(surface energy balance, SEB)是研究它们最直接、最客观的方法^[10].地表能量平衡需要观测的量包括辐射四分量、感热通量和潜热通量.辐射四分量可以通过辐射计直接测得,而感热通量和潜热通量的观测则依赖于涡度相关技术.涡度相关技术(EC)是全球通量观测网络(FLUXNET)测定各通量(感热通量、潜热通量等)的主要技术手段^[11-12].几乎所有对城市地表能量平衡的观测都开始于1970年^[13],国外的大多数城市SEB观测都是在欧洲和北美进行的^[14-19],国内的SEB观测主要集中在北京、南京等城市^[20-22].合肥市关于这方面的研究还较少,并且合肥市与北京、南京等开展较多研究的城市的不同之处在于,合肥市南侧有我国五大淡水湖之一的巢湖,北侧有大房郢水库,西北侧有董铺水库,淡水湖泊也会对局地气候产生较大的影响.

本文利用位于合肥市区内中国科学技术大学和位于郊区董铺水库上的科学岛的观察铁塔提供

的观测数据,从气象要素、城市热岛强度、地表能量平衡三个方面去分析城、郊的差异,为进一步认识城市气候的成因和影响机制提供科学的依据.

1 实验方案与装置

1.1 观测环境、观测设备与资料

我们在合肥市区和西郊分别选择具有代表性的地点实施常规气象要素和通量等参数的测量,如图1所示.



图1 城郊站点及其周围环境

Fig. 1 Urban and suburban sites and their surroundings

本次实验共有两个观测站,分别为位于城区的中国科学技术大学东校区第一教学楼观测站(简称中科大站)和位于郊区的中国科学院合肥物质科学研究院观测站(简称科学岛站).中科大站的观测仪器安装在校园内第一教学楼楼顶(如图1).该教学楼南北朝向,楼高14m.以观测点为中心1km范围内主要是住宅区、商业区域以及教学区域,属于典型城市下垫面.观测塔分别在2m、5m、10m高度处装有微气象观测仪器(HMP155A温度湿度传感器).在10m处装有CNR4四分量辐射计、CSAT3超声风速仪以及H₂O/CO₂红外分析仪(LI-7500),数据采集器为CR5000(Campbell),采样频率均为10Hz.科学岛站位于合肥市西郊董铺水库包围的一个半岛之上,距离市区近10km.科学岛站周围有草地、树林以及稀疏建筑物,地势空旷,站点地理位置和下垫面反映了郊区的地表特征.科学岛站的观测塔分为5m、10m、15m、23m、31m共5层,每层均装有微气象观测仪器(HMP155A温度湿度传感器).在塔1.5m处安装了CNR1四分量辐射计,在10m处安装了CSAT3超声风速仪以及H₂O/CO₂红外分析仪(LI-7500),数据采集器为CR5000(Campbell),采样频率均为10Hz.

观测实验于2013年1月5日至10月10日进行.由于科学岛站经常有数据缺测,其中6月上旬至9月上旬缺测了大量数据,为了方便进行计算,我们仅选取有连续且完整24小时的数据进行统计,共遴选出118天的数据进行比较分析,其中春季46天(3月、4月、5月),冬季27天(1月、2月),夏季22天(6月),秋季23天(9月、10月).

1.2 资料处理与研究方法

本文首先对数据进行了严格的前期处理,采用方法包括野值点的剔除、坐标旋转修正、WPL修正以及夜间静稳条件下的修正^[23],本文所用数据后处

理及质量控制参见文献[24]. 我们用太阳直接辐射强度的实测值和理论值的比值来定义晴天和阴天:

$$\alpha = R/T \quad (1)$$

式中, R 为实测的太阳辐射值积分, T 为测量高度每日太阳辐射理论值, 计算方法参见文献[25]. 当 $\alpha > 0.7$ 时认为当天为晴天, 当 $\alpha < 0.7$ 时认为当天是阴天. 这样我们共得到的晴天数据为春季 27 天、夏季 11 天、秋季 19 天、冬季 14 天.

当前公认的 UHI 类型有三种^[26-27]: 第一种是冠层城市热岛 (canopy layer urban heat island, CLUHI), CLUHI 位于地面之上, 达到建筑物的平均高度; 第二种是边界层城市热岛 (boundary layer urban heat island, BLUHI), BLUHI 位于建筑物的平均高度之上, 并延伸到城市中污染物排放可以达到的高度^[28]; 第三种是地表层城市热岛 (surface urban heat island, SUHI), 是指直接通过遥感方法测量的直接地表温度^[29]. 本文采用第一种方法来定义热岛强度. 我们使用中科大站气象铁塔一层温度 (离地 16 m, 楼高 14 m, 实际距离城市冠层顶的高度大约为 2 m) 减去科学岛站气象铁塔的一层温度 (5 m) 作为热岛 (UHI) 强度的定义. 中国科学技术大学东校区校园内除了最南和最北端的两座楼以外, 主要为较高的树木和四层建筑. 树木的树冠和四层楼的楼顶高度相当, 因此校园的冠层处于同一水平, 高度约为 14 m, 可以认为是一个平坦的冠层平面^[30]. 科学岛站气象铁塔周围多为草地和较矮的树木, 我们用最低层铁塔的温度代表其冠层高度的温度. 因此这里给出的热岛结果代表的是冠层城市热岛.

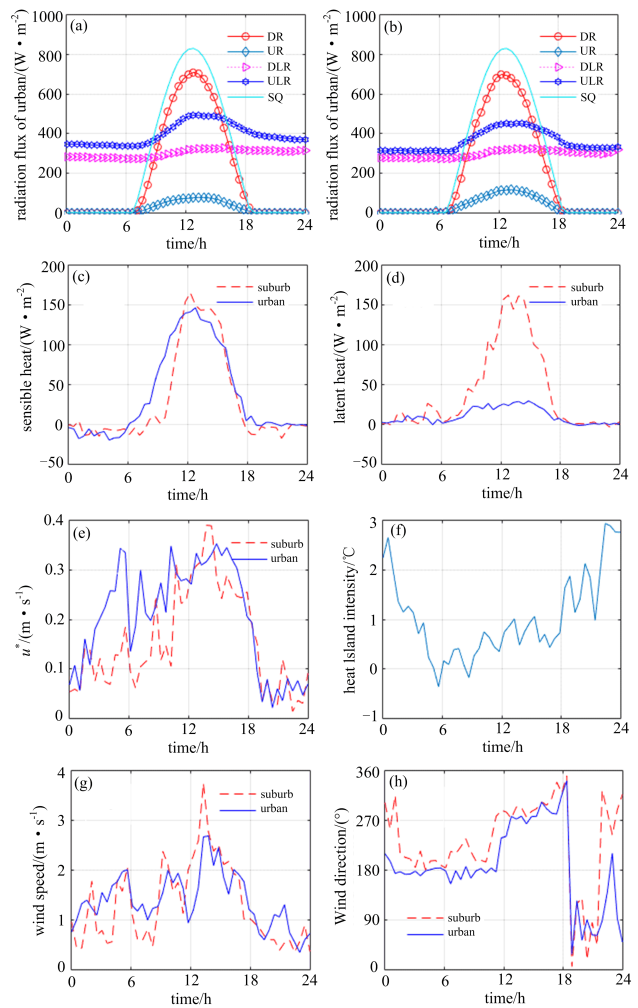
2 结果与分析

2.1 春季晴天条件下地气通量以及各气象要素差异

我们选取 2013 年 3 月 4 日的观测资料进行春季城、郊典型晴天天气条件下城、郊气象要素和地气通量的对比见图 2.

如图 2(a) 和 (b), 春季典型晴天条件下城、郊太阳短波辐射均在正午 12 点半达到最大值, 分别为 710 W/m^2 和 713 W/m^2 , 日照时间均为 11 h. 城、郊的地表反射辐射日均值分别为 22.9 W/m^2 和 33.4 W/m^2 . 日间城区的地表反射辐射要小于郊区, 这是因为中科大站气象观测塔架设在教学楼楼顶, 其下垫面为黑色防水油毡纸, 可以近似认为是黑体, 对太阳辐射的吸收能力较强, 升温较快, 而科学岛站下垫面为草地, 对太阳辐射的反射能力较强, 升温较慢. 地表辐射日均值分别为 395 W/m^2 和 361.5 W/m^2 , 城区地表辐射明显要高于郊区, 原因同样是因为下垫面的不同. 城、郊的大气逆辐射日均值分别为 301 W/m^2 和 297 W/m^2 , 城区的大气逆辐射日均值要略高于郊区, 所以晴朗无云天气条件下城区的大气逆辐射要高于郊区.

如图 2(c) 所示, 城区站点的感热通量从 6:00 开始变为正值并且迅速增大, 而郊区站点从 7:00 开始感热通量变成正值, 9:00 之后才迅速增加. 这是



(a) 和 (b) 分别为 2013 年 3 月 4 日城、郊辐射能量日变化时序图; (c)、(d)、(e)、(g)、(h) 分别 2013 年 3 月 4 日城、郊感热, 潜热, 摩擦速度, 风速, 风向差异日变化比较; (f) 为 2013 年 3 月 4 日热岛强度日变化时序图. DR、UR、DLR、ULR、SQ 分别代表向下短波辐射, 向上短波辐射, 向下长波辐射, 向上长波辐射以及太阳辐射理论值.

图 2 2013 年 3 月 4 日城、郊气象要素及通量日变化时序图
Fig. 2 The diurnal variation of meteorological elements and surface fluxes in urban and suburban on March 4, 2013

因为郊区站点属于自然下垫面, 夜间没有太阳辐射的情况下, 地表降温比大气降温要快得多, 地表与底层大气交换热量, 造成底层大气温度要低于其上层大气, 所以易形成逆温层结. 而城区站点属于城市下垫面, 含有人为热, 早晚时分更是人为热的高峰时分, 所以早上城区站点形成不稳定层结的时间要早于郊区站点. 城区站点感热通量日均值要高于郊区站点, 分别为 36.8 W/m^2 和 29.6 W/m^2 .

如图 2(d) 所示, 2013 年 3 月 4 日城区站点全天潜热通量较小, 在下午 14 点半达到最大值 29.4 W/m^2 . 而郊区站点日间潜热通量值较大, 在 12 点半左右达到最大值 162 W/m^2 . 这是因为潜热通量密度的变化与水的物态变化密切相关, 液态水汽化变成气态水这个汽化过程会吸收热量, 水的多少会直接影响潜热通量密度的大小. 城区站点位于合肥市包河区金寨路东侧, 四面都是钢筋水泥建筑物, 水量较少.

而郊区站点位于合肥市庐阳区董铺水库科学岛上,科学岛为西北—东南走向的半岛,三面环水,水量充足.所以春季典型晴天条件下日间郊区的潜热通量密度要大于城区,日均值分别为 40.5 和 10.2 W/m^2 .

图 2(e)为 2013 年 3 月 4 日城、郊摩擦速度 u^* 对比图.日间风速较大,城区站点日间的摩擦速度均值为 0.28 m/s ,略高于郊区的 0.23 m/s ,从 0 点到 14 点,两个站点的摩擦速度均缓缓增加.从 16 点之后均急速下降,18 点之后均回落到 0.1 m/s 以下.

如图 2(f),3 月 4 日日间热岛强度较小,均值为 0.53 $^{\circ}\text{C}$;夜间热岛强度较大,均值为 1.57 $^{\circ}\text{C}$,晚上 21:00 达到最大值 2.94 $^{\circ}\text{C}$.这是因为日间太阳辐射加热地表,地表升温后再加热大气,日间的气温很大程度上受太阳辐射影响,而两个站点的太阳辐射基本一致.夜间没有太阳辐射,地表降温引起大气降温,但是夜间城区较大量的人为热排放使得城区温度相对较高.

如图 2(g)和(h),我们选取两个站点超声风速仪的数据来进行风速和风向的对比,城、郊站点的超声风速仪均在 10m 铁塔的位置.城、郊站点夜间

风速较小,而日间风速相对较大.这是因为白天太阳辐射加热地表形成不稳定层结,从而加速了大气上下层之间的湍流运动,而上层的风速总是比下层的风速大,上下层之间的湍流运动引发了动量交换,所以日间风速变大.除了在 0:00~1:30 和 22:00~24:00 这两个时间段城、郊两个站点的风向有差异外,其余时段两个站点风向的一致性较好.

表 1 给出了春季晴天条件下城、郊地气通量及气象要素平均值统计.日间城、郊的感热通量平均值分别为 91.2 W/m^2 和 58.7 W/m^2 ,差值为 32.5 W/m^2 .潜热通量平均值分别为 41.95 和 102.65 W/m^2 ,差值为 60.7 W/m^2 .城、郊日间波文比的平均值分别为 2.97 和 0.57,城区的能量支配方式以感热为主,郊区的能量支配方式以潜热为主.这是因为城区下垫面相对比较干燥,热量大多以感热方式向上输送,对应的空气也较不稳定,所以波文比的值较高.而位于郊区的科学岛站点被董铺水库环绕,热量多以潜热方式向上输送,所以科学岛站附近波文比值较小.春季晴天日间平均热岛强度为 0.31 $^{\circ}\text{C}$,夜间平均热岛强度为 1.43 $^{\circ}\text{C}$.

表 1 春季晴天条件下城、郊地气通量及气象要素平均值统计表

Tab. 1 Average statistics of meteorological elements and surface fluxes in spring sunny weather in urban and suburban

parameters	Daytime of sunny day		Night of sunny day	
	Urban site	Suburban site	Urban site	Suburban site
Sensible heat/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	91.2	58.7	-11.6	-13.5
Latent heat/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	41.95	102.65	7.52	14.69
Wind speed/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.16	1.97	1.70	1.32
u^* /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.29	0.25	0.24	0.18
Bowen ratio	2.97	0.57	—	—
UHI intensity/ $^{\circ}\text{C}$	0.31		1.43	

2.2 夏季晴天条件下地气通量以及各气象要素差异

城、郊的地气通量和气象要素会随着季节变化而呈现出不一样的差异.图 3 给出 2013 年 6 月 13 日夏季典型晴天气象要素随时间的变化.因为一些观测物理量的城、郊差异在不同季节之间并没有明显的不同,我们仅对随季节有变化的物理量进行分析,如感热、潜热、热岛、风向等.

由图 3(a)可知,城、郊上午 6:00 开始形成不稳定层结,感热通量均开始增加,在 12:30 时均达到最大值,分别为 202.4 W/m^2 和 148.5 W/m^2 ,18:00 之后两个站点几乎同时回到稳定层结.相对春季典型晴天 3 月 4 日,城区的感热通量均值有了较大幅度的增加,郊区日间出现不稳定层结的时间增加了 1.5 h.

由图 3(b)可知,城、郊的潜热通量从上午 6:00 开始增加,分别在 12:00 和 11:30 时达到最大值(154.8 W/m^2 和 204.7 W/m^2).相对春季典型晴天 3 月 4 日而言,中科大站的潜热通量有了大幅度的增长.因为第一教学楼下垫面极度干燥,13 日之前两天也均为晴天,没有降雨,为了考查这较高的潜热通量来源,我们研究了中科大站的周边环境.如图 1 所示,中科大第一教学楼南侧和东侧、西侧均为

树林.由图 3(d),6 月 13 日日间城区站点风向为南风.考虑到第一教学楼南侧有大片树林,夏季植物的蒸腾作用较为旺盛,会产生大量的潜热,所以当风向为南风时,第一教学楼的气象铁塔可以观测到大量的潜热.夏季(6 月 1 日至 6 月 20 日)典型晴天,城区日间潜热通量平均值为全年最高(81 W/m^2).

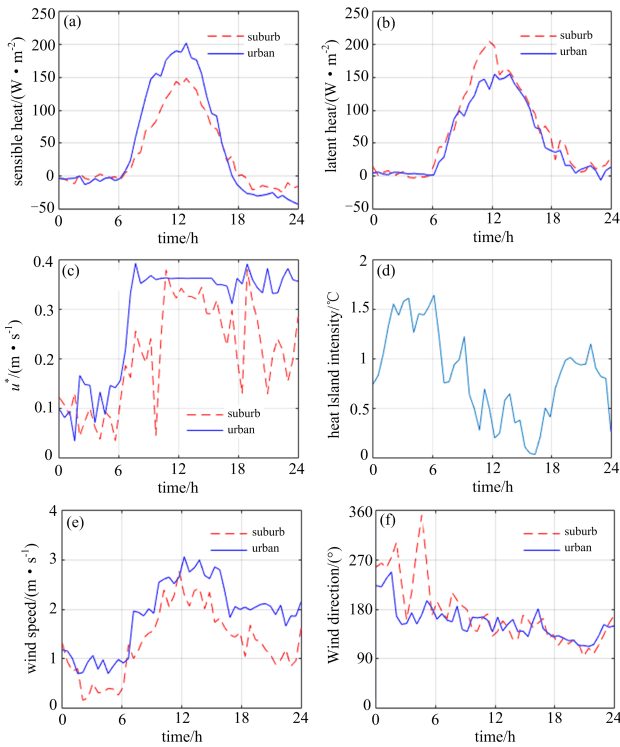
由图 3(c)、(d)、(e)、(f),6 月 13 日夜间城区站点以西南风为主,而郊区站点以西北风为主,之后城郊站点风向大多时候为南风,日间平均热岛强度为 0.57 $^{\circ}\text{C}$,夜间平均热岛强度为 1.09 $^{\circ}\text{C}$.夏季典型晴天夜间的热岛强度平均值相比较春季典型晴天减小了 1.61 $^{\circ}\text{C}$.夜间城区站点的风速和摩擦速度均要明显高于郊区,城区站点的夜间平均摩擦速度为 0.24 m/s ,郊区站点的夜间平均摩擦速度为 0.15 m/s .

表 2 给出了夏季晴天条件下城、郊地气通量及气象要素的平均值统计.夏季晴天城、郊感热通量均值,分别为 109.2 W/m^2 和 63.4 W/m^2 ,差值为 45.8 W/m^2 .潜热通量均值分别为 81 W/m^2 和 113.4 W/m^2 ,差值为 32.4 W/m^2 .日间城、郊波文比分别为 1.34 和 0.56,可见城区由于夏季树木蒸腾作用的影响,波文比减小了许多.日间热岛强度均值为 0.51 $^{\circ}\text{C}$,夜间热岛强度均值为 0.86 $^{\circ}\text{C}$.

表 2 夏季晴天条件下城、郊地气通量及气象要素平均值统计表

Tab. 2 Average statistics of meteorological elements and surface fluxes in summer sunny weather in urban and suburban

parameters	Daytime of sunny day		Night of sunny day	
	Urban site	Suburban site	Urban site	Suburban site
Sensible heat/($W \cdot m^{-2}$)	109.2	63.4	-17.1	-5.7
Latent heat/($W \cdot m^{-2}$)	81	113.4	9.2	16
Wind speed/($m \cdot s^{-1}$)	2.08	1.71	1.34	1.15
u^* /($m \cdot s^{-1}$)	0.28	0.24	0.23	0.16
Bowen ratio	1.34	0.56	—	—
UHI intensity/ $^{\circ}C$	0.51		0.76	



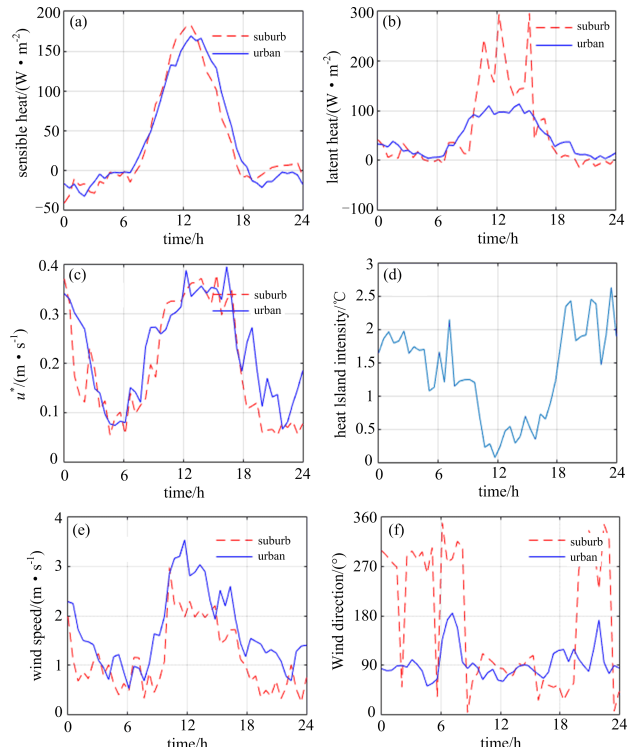
(a)、(b)、(c)、(e)、(f)分别为 2013 年 6 月 13 日城、郊感热,潜热,摩擦速度,风速,风向差异日变化比较;(d)为 2013 年 6 月 13 日热岛强度日变化时序图。

图 3 2013 年 6 月 13 日城、郊气象要素及通量日变化时序图
Fig. 3 The diurnal variation of meteorological elements and surface fluxes in urban and suburban on June 13, 2013

2.3 秋季晴天条件下地气通量以及各气象要素差异

我们选取具有代表性的 2013 年 10 月 3 日的观测数据分析秋季典型晴天城郊的差异,如图 4 所示。

由图 4(a)可知,秋季典型晴天城、郊感热通量值较为接近,城区的感热通量均值比郊区略高。城区形成不稳定层结时间比郊区长 2 h。如图 4(b),郊区的潜热通量值在 12:00 达到最大值 294.5 W/m^2 ,城区的潜热通量值在 11:00 达到最大值 109.4 W/m^2 。当天城区风向以东风为主,所以城区依然有着较高的潜热通量值。如图 4(c)、(d)、(e)和(f),秋季晴天夜间热岛强度值较高,夜间 23:00 达到最大值 2.5 $^{\circ}C$,在 0:00~8:30 和 19:30~24:00 郊区热岛强度处于较高值时,郊区站点均为北风。这是因为郊区站点位于董铺水库包围的半岛上,夜间地表温度降温较快,而水库降温较慢,水库上方的空气



(a)、(b)、(c)、(e)、(f)分别 2013 年 10 月 3 日城、郊感热,潜热,摩擦速度,风速,风向差异日变化比较;(d)为 2013 年 10 月 3 日热岛强度日变化时序图。

图 4 2013 年 10 月 3 日城、郊气象要素及通量日变化时序图
Fig. 4 The diurnal variation of meteorological elements and surface fluxes in urban and suburban on October 3, 2013

温度要比科学岛上方的空气温度高,从而形成了北风。又因为科学岛是西北—东南走向,三面环水,所以夜间从水库刮来的风有北风、东北风、西北风。

表 3 给出了秋季晴天条件下城、郊地气通量及气象要素平均值统计。秋季晴天城、郊感热通量分别为 67.9 W/m^2 和 58.1 W/m^2 ,潜热通量均值分别为 71.43 W/m^2 和 119.47 W/m^2 ,波文比均值分别为 0.95 和 0.49。日间热岛强度均值为 0.49 $^{\circ}C$,夜间热岛强度均值为 1.72 $^{\circ}C$ 。

2.4 冬季晴天条件下地气通量以及各气象要素差异

我们选取了 2013 年 1 月 5 日的观测数据来分析冬季典型晴天城郊的差异,如图 5 所示。

由图 5(a)可知,郊区站点形成不稳定层结的时间为 8:30~17:00,而城区站点几乎全天均为不稳定层结,这是因为冬季中国科学技术大学校园内集

表 3 秋季晴天条件下城、郊地气通量及气象要素平均值统计表

Tab. 3 Average statistics of meteorological elements and surface fluxes in autumn sunny weather in urban and suburban

parameters	Daytime of sunny day		Night of sunny day	
	Urban site	Suburban site	Urban site	Suburban site
Sensible heat/($W \cdot m^{-2}$)	67.9	58.1	-12.68	-14.02
Latent heat/($W \cdot m^{-2}$)	71.43	119.47	13.28	11.9
Wind speed/($m \cdot s^{-1}$)	2.2	1.57	1.66	1.06
u^* /($m \cdot s^{-1}$)	0.29	0.25	0.22	0.16
Bowen ratio	0.95	0.49	—	—
UHI intensity/ $^{\circ}C$	0.49		1.72	

中供暖产生一定量的人为热,所以夜间为不稳定层结。而冬季城、郊的感热通量值相比较其他三个季节而言均减小了许多,城区在 13:00 达到最大值 $100 W/m^2$,郊区在 12:30 达到最大值 $108 W/m^2$ 。由图 5(b)可知,由于冬季合肥地区温度较低,且城、郊风速均较小,所以城、郊潜热通量也均较小,郊区站点在上午 10:00 达到最大值 $35.33 W/m^2$,城区站点在 13:30 时达到最大值 $7 W/m^2$ 。由图 5(c)、(e)和(f)可知,冬季城、郊均以北风为主,摩擦速度、风速均要小于其他三个季节。由图 5(d)可知,冬季的热岛强度表现出明显的双峰特性,分别在 7:00 和 20:30 达到峰值 $1.66^{\circ}C$ 和 $2.8^{\circ}C$ 。

表 4 给出了冬季晴天条件下城、郊地气通量及气象要素平均值统计。可以看到,不同于其他季节,城区夜间感热通量均值为正值,大小为 $4.42 W/m^2$,这主要是冬季集中供暖的缘故。冬季晴天城、郊日间潜热通量均值分别为 8.55 和 $30.91 W/m^2$,为四季之中最小值。城、郊日均波文比均值分别为 8.66 和 1.65 ,体现了冬季蒸发量小、层结明显、城市干燥,这无疑会对冬季的大气环流产生不可忽视的影响。夜间热岛强度均值为 $1.97^{\circ}C$,为一年四季中的最大值。

3 结论

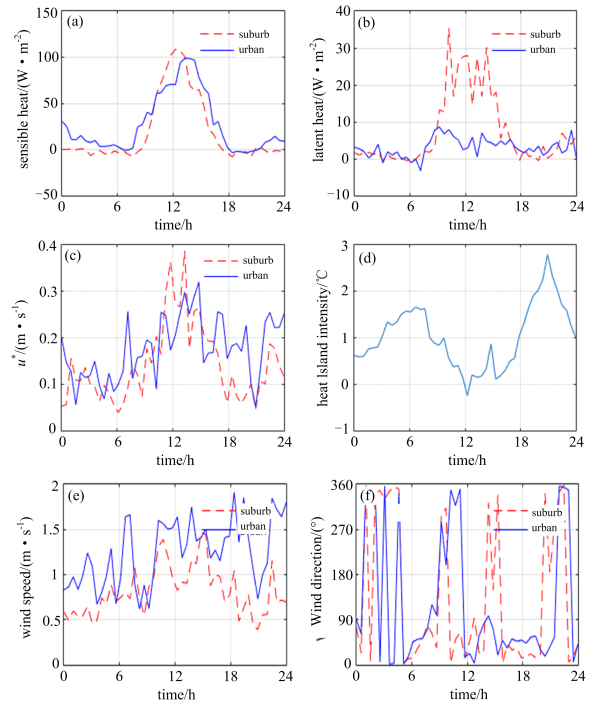
通过对 2013 年中国科学技术大学站和科学岛站共计 8 个月辐射四分量数据的对比分析,得出结论:

表 4 冬季晴天条件下城、郊地气通量及气象要素平均值统计表

Tab. 4 Average statistics of meteorological elements and surface fluxes in winter sunny weather in urban and suburban

parameters	Daytime of sunny day		Night of sunny day	
	Urban site	Suburban site	Urban site	Suburban site
Sensible heat/($W \cdot m^{-2}$)	74.11	51.15	4.42	-9.46
Latent heat/($W \cdot m^{-2}$)	8.55	30.91	1.94	3.47
Wind speed/($m \cdot s^{-1}$)	1.76	1.53	1.27	1.06
u^* /($m \cdot s^{-1}$)	0.27	0.22	0.19	0.15
Bowen ratio	8.66	1.65	—	—
UHI intensity/ $^{\circ}C$	0.58		1.97	

(I) 日间中科大站形成不稳定层结的时间均值比科学岛站长约 3 h,在冬、春、秋季节夜间科学岛站容易形成极强的稳定层结,并且由于夜间董铺水库上方空气温度比科学岛上方同高度空气温度高,因此容易形成局地环流,这三个季节科学岛站夜间容易形成北风,北风会给科学岛带来大量的水汽,增加科学岛地区夜间的湿度,更加促进这种层



(a)、(b)、(c)、(e)、(f) 分别 2013 年 1 月 5 日城、郊感热,潜热,摩擦速度,风速,风向差异日变化比较;(d) 为 2013 年 1 月 5 日热岛强度日变化时序图。

图 5 2013 年 1 月 5 日城、郊气象要素及通量日变化时序图

Fig. 5 The diurnal variation of meteorological elements and surface fluxes in urban and suburban on January 5, 2013

结的稳定性,这是淡水湖泊给局地气候带来的影响。

(II) 夜间的热岛强度强于日间的热岛强度。白天向夜间过渡,热岛加强;而夜间向白天过渡,热岛减弱。四个季节夜间热岛强度均值大小关系如下:冬季>秋季>春季>夏季。冬季晴天夜间的热岛强度均值达到最大值 $1.73^{\circ}C$,夏季晴天天气条件下夜间的热岛强度达到最小值 $0.69^{\circ}C$ 。冬季夜间热岛强

度最大,而夏季夜间热岛强度最小。

(Ⅲ)城区的能量支配方式以感热为主,郊区的能量支配方式以潜热为主。城区的感热通量日均值总是要高于郊区。从时序上来看,城、郊的感热通量日均值大小关系为:冬季<春季<夏季,城、郊的潜热通量日均值大小关系为:冬季<春季<夏季。郊区波文比值始终处于较低水平,而城区波文比值季节差异较大,冬季最高达到 8.66,夏季最小为 1.26。

参考文献(References)

- [1] ZHOU L M, DICKINSON R E, TIAN Y H, et al. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(26): 9540-9544.
- [2] KALNAY E, CAI M. Erratum; Corrigendum: Impact of urbanization and land-use change on climate[J]. Nature, 2003, 425(6953): 102.
- [3] KNODEL J. United Nations Population Division: Living Arrangements of Older Persons Around the World[J]. Population and Development Review, 2006, 32(2): 373.
- [4] HOWARD L. The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made in the Metropolis and at Various Places Around It[M]. London: Harvey and Darton, 1833.
- [5] MANLEY G. On the frequency of snowfall in metropolitan England[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1958, 84(359): 70-72.
- [6] 周明煜, 曲绍厚, 李玉英, 等. 北京地区热岛和热岛环流特征[J]. 环境科学, 1980(5): 12-18.
- [7] 徐伟, 杨涵涌, 张仕鹏, 等. 上海城市热岛的变化特征[J]. 热带气象学报, 2018, 34(2): 228-238.
- [8] 李庆祥, 张洪政, 刘小宁, 等. 中国城市热岛效应的证据及对中国区域气候变化的影响[C]// 中国气象学会 2004 年年会会议论文集. 北京: 中国气象学会, 2004.
- [9] 纪瑞鹏, 张喜民, 李刚. 沈阳等 6 城市热岛效应卫星监测研究[J]. 辽宁气象, 2000(4): 22-23.
- [10] BALDOCCHI D, FALGE E, GU L, et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [11] CAMPBELL G S, NORMAN J M, SPRINGERLINK O S. An Introduction to Environmental Biophysics [M]. New York: Springer, 1998.
- [12] MARGULIS S. Handbook of micrometeorology: A guide for surface flux measurement and analysis[M]. Boston: American Meteorological Society, 2006: 87, 957.
- [13] ARNFELD A J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island[J]. International Journal of Climatology, 2003, 23(1): 1-26.
- [14] GRIMMOND C, OKE T R. Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS)[J]. Journal of Applied Meteorology, 2002, 41(7): 792.
- [15] NEMITZ E, HARGREAVES K J, MCDONALD A G, et al. Micrometeorological measurements of the urban heat budget and CO₂ emissions on a city scale [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(14): 3139-3146.
- [16] CHRISTEN A, VOGT R. Energy and radiation balance of a central European city[J]. International Journal of Climatology, 2004, 24(11): 1395-1421.
- [17] VELASCO E, VELASCO E, PRESSLEY S, et al. Energy balance in urban Mexico City: Observation and parameterization during the MILAGRO/MCMA-2006 field campaign [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2011, 103(3): 501-517.
- [18] GOLDBACH A, KUTTLER W. Quantification of turbulent heat fluxes for adaptation strategies within urban planning [J]. International Journal of Climatology, 2013, 33(1): 143-159.
- [19] CHOW W T L, VOLO T J, VIVONI E R, et al. Seasonal dynamics of a suburban energy balance in Phoenix, Arizona [J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(15): 3863-3880.
- [20] 王成刚, 孙鉴泞, 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(3): 270-279.
- [21] 彭江良, 吴息, 江志红, 等. 南京冬季城、郊下垫面能量平衡特征分析[J]. 气象科学, 2008, 28(1): 21-29.
- [22] 苗世光, 窦军霞, CHEN F, 等. 北京城市地表能量平衡特征观测分析[J]. 中国科学:地球科学, 2012, 42(9): 1394-1402.
- [23] YUAN R, KANG M, et al. Expansion of the planar-fit method to estimate flux over complex terrain[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2011, 110(3): 123-133.
- [24] 王咏薇, 王雪倩, 胡楠, 等. 城市地表湍流观测数据的后处理及质量控制[J]. 气象科学, 2013, 33(2): 153-159.
- [25] YUAN R, ZHANG X, LIU H, et al. Aerosol vertical mass flux measurements during heavy aerosol pollution episodes at a rural site and an urban site in the Beijing area of the North China Plain [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(20): 12857-12874.
- [26] OKE T R. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat Islands [J]. Atmosphere, 1976, 14(4): 268-277.
- [27] SHAKER R, ALTMAN Y, DENG C, et al. Investigating urban heat island through spatial analysis of New York City streetscapes[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 972-992.
- [28] RICHARDS K, OKE T R. Validation and results of a scale model of dew deposition in urban environments [J]. International Journal of Climatology, 2002, 22(15): 1915-1933.
- [29] CONNORS J P, GALLETTI C S, et al. Landscape configuration and urban heat island effects: Assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona [J]. Landscape Ecology, 2013, 28(2): 271-283.
- [30] YUAN R M, LUO T, SUN J N, et al. A new method for estimating aerosol mass flux in the urban surface layer using LAS technology [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 9(4): 1925-1937.