

上海城市热岛与热浪协同作用及其影响因子

敖翔宇^{1,2,4}, 谈建国^{3,4}, 支 星⁵, 过霁冰⁶, 陆一闻¹, 刘冬韡¹

(1. 上海市生态气象和卫星遥感中心, 上海 200030; 2. 南京大学大气科学学院, 南京 210023;
3. 上海市气候中心, 上海 200030; 4. 上海市气象与健康重点实验室, 上海 200030;
5. 上海市气象局科技发展处, 上海 200030; 6. 上海市奉贤区气象局, 上海 201499)

摘要: 在全球变暖的背景下, 热浪变得更加频繁。城市地区由于城市热岛效应在热浪事件中承受更大的风险。然而城市热岛与热浪之间的相互作用还少有研究。利用2016-2017年两个夏季(6-8月)上海城、郊气象站逐时气温、风速、相对湿度资料、城区徐家汇和郊区奉贤涡动相关通量观测资料对比分析了热浪和非热浪期间城市热岛强度的差异, 并利用一个平流扩散解析模型揭示了城市热岛与热浪相互作用的物理机制。结果表明, 热浪期间的城市热岛强度相比非热浪期间明显增强, 且白天增强大于夜间, 显示出城市热岛与热浪之间的协同效应。热浪期间城、郊相对湿度比值相对非热浪期间明显减小, 表明热浪期间城区地表相对郊区变得更干, 从而抑制了蒸发作用, 加剧了城市热岛强度; 平均风速也明显减小, 平流降温效应减弱, 对城市热岛强度起正反馈效应。热浪期间城区净辐射通量的增加大于郊区, 使城区获得更大地表辐射输入; 由于城区更少的植被覆盖和更多的不透水下垫面, 热浪期间城区潜热通量略有降低, 而郊区明显增加; 城区感热通量增幅则大于郊区, 这种感热和潜热通量分配的改变也加剧了城市热岛强度。本研究对城市如何应对加剧的热风险具有重要的科学指示意义。

关键词: 城市热岛; 热浪; 解析模型; 辐射通量; 感热通量; 潜热通量

DOI: 10.11821/dlxb201909007

1 引言

在全球气候变暖的背景下, 极端天气事件在世界各地的发生频率变得更频繁、强度更大、持续时间更长、影响范围更广^[1-2]。由于高温事件是影响人体健康最主要的天气灾害而受到科学家和政府部门越来越多的关注^[3-4]。例如, 在欧洲^[5]、美国^[6]和中国^[7-8]均发生史无前例的热浪(Heat Wave, HW)事件, 造成很大的死亡和致病率。从概率论的角度来讲, 平均气温的上升必然使统计的偏热天气出现的概率明显增加, 并且原来很少出现的极热天气也可能会频繁出现。许多研究表明, 未来人类处于热致死的天数将大大增加^[9-10]。

热浪的定义目前在国际上还未形成统一标准^[11], 它通常是指持续数天甚至数周、影响范围较大(区域尺度)的极端酷热天气^[12]。热浪期间的天气一般是晴朗少云, 风小^[13]。在中国东部, 热浪主要受大尺度天气系统西太平洋副热带高压控制(深厚暖性高压系统), 盛行下沉气流, 严重抑制了近地层热量的扩散以及对流云的形成^[14]。城市地区由于

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2019-07-18

基金项目: 上海市科委项目(17DZ1205300, 19YF1443900); 国家自然科学基金项目(41775019); 上海市气象局面上项目(MS201803) [Foundation: Project of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality, No.17DZ1205300, No.19YF1443900; National Natural Science Foundation of China, No.41775019; Project of Scientific and Technological Development of the Shanghai Meteorological Service, No.MS201803]

作者简介: 敖翔宇(1988-), 女, 江西萍乡人, 博士生, 工程师, 研究方向为城市气象。E-mail: aoxy@simets.cn

通讯作者: 刘冬韡(1979-), 男, 江西赣州人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为城市气象。E-mail: 54745469@qq.com

存在城市热岛 (Urban Heat Island, UHI) 现象以及稠密的人口密度^[15], 对于极热事件的应对更为脆弱。城市热岛是城市最为显著的气候特征之一, 影响范围通常为较小的城市尺度或局地尺度^[16-17], 城市热岛产生的根本原因在于下垫面属性的改变和人为热排放使原有地表与大气之间的能量交换发生变化^[16, 18]。同时, 外部的气象条件以及地理位置 (如内陆或沿海) 也对热岛的形成有重要影响, 例如云量、风速等都是影响城市热岛的关键因子^[19-20]。而这些因子在热浪天气条件下都有很大的改变, 因此热浪很有可能对城市热岛有很大的影响^[21-22], 然而, 关于热浪与城市热岛之间的相互作用方面的研究还很有限, 且仍未有定论。Li 等^[23-25]结合观测、数值模拟以及一个解析模型研究了内陆城市美国巴尔地摩、北京大城市区的几次热浪事件与城市热岛之间的相互作用, 发现夜间城市热岛强于白天, 热浪对城市热岛具有明显的协同加强作用。Founda 等^[26]则研究了沿海城市希腊雅典的一次热浪事件, 结果表明热浪与城市热岛之间同样存在明显的协同加强作用, 但是具有与内陆城市不同的特点, 城市热岛表现为白天强于夜间, 且很大程度受到海陆风环流的影响, 距离海岸的远近不同, 协同效应强度也有所区别。这些研究均表明城乡地表能量收支各项在热浪期间的不同响应以及环境气象条件的差异 (如风场、大气稳定度) 是造成热浪与城市热岛协同加强的重要原因。Sun 等^[27]的研究也再次强调热浪期间城市储热通量存在明显增强。最近的一项研究^[28]分析了 2000-2015 年期间美国 54 个城市的热岛特征, 其结果则表明在热浪情况下, 大部分城市 (38/54) 的城市热岛强度减弱。然而该研究主要依赖于统计学方法, 而没有分析热浪情形下地表能量平衡的响应。

基于以往对城市热岛和热浪之间相互增强或减弱还未形成定论, 各研究主要聚焦于单个影响因子的分析, 且不同城市所处气候背景、地理位置以及城市规模的差异, 影响热浪与城市热岛的因子存在很大差异^[21], 因此需要对不同城市分别展开研究。上海作为中国人口最多的大都市, 地处长江下游区域, 属副热带季风气候区, 为极端高温天气多发地区^[29]。作为东部沿海城市, 同时受海陆风环流与城市热岛环流的影响^[30-31], 考虑到世界上大多数城市为临海而建, 研究上海热浪与城市热岛相互作用可为其他城市提供科学参考。近年来上海地区的极端高温热浪事件呈现增加趋势, 严重影响城市的正常运行、能源消耗以及居民身体健康。因此, 本文将以上海作为研究对象, 综合收集各类观测资料, 分析热浪 (HW) 与非热浪 (NHW) 背景下上海城市热岛强度 (Urban Heat Island Index, UHII) 的差异, 以及城、郊地表能量平衡各项和大气条件多项影响因子的不同响应, 以期揭示上海城市热浪与城市热岛相互作用的物理机制。本研究对于城市应对加剧的热风险减缓对策具有重要的科学意义。

2 资料与方法

2.1 资料

本文所用观测资料包括: ① 上海市 2016-2017 年两个夏季 (6-8 月) 11 个基本自动气象站 (AWS, 图 1) 的逐时气温、风速、相对湿度资料。将徐家汇站 (XJH/XH) 作为城市站点, 闵行 (MH)、宝山 (BS)、浦东 (PD) 和嘉定 (JD) 作为近郊站点, 崇明 (CM)、南汇 (NH)、金山 (JS)、青浦 (QP)、松江 (SJ) 和奉贤 (FX) 作为远郊站点^[32]。这两个夏季的资料除了 CM 站缺测率为 2.2% 以外, 其他站均无缺测, 缺测的资料使用线性插值进行了填补。② XJH 和 FX 站相应时段的涡动相关地表通量观测资料。XJH 通量站观测仪器位于上海市气象局业务大楼楼顶 25 m 高的观测塔, 楼高 55 m, 因此探测高度

距离地面约为80 m。XJH站周边为典型的都市商业区,建筑物高耸密集。FX通量站观测仪器安装在28 m的铁塔上,站点周边建筑物较为低矮稀疏,为典型的郊区下垫面。两个站点使用了相同的观测仪器,向上、向下短波、长波辐射通量由四分量辐射通量观测仪(CNR4, Kipp & Zonen)获取,感热和潜热通量则由集成开路红外气体分析仪和超声风速仪(IRGASON)测量得到,数据采集器型号为CR3000,采样频率为10 Hz。

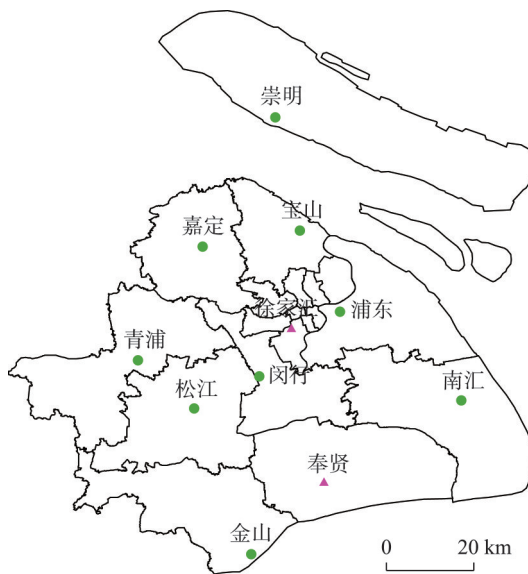
为更好地解读观测通量与来流贡献区域之间的关系,本文利用Kormann等^[33]通量源区模型(Footprint)分析了两个通量站的源区印痕分布(图2)。Kormann等^[33]源区模型已被广泛应用于国内外复杂下垫面的气候学足迹分析,大量研究表明了该模型计算结果的可靠性^[34-35]。该模型主要基于近地层风速的幂指数廓线和高斯扩散原理,所需输入参数包括观测高度、粗糙度、风速风向、侧向风速标准差、摩擦速度、M-O长度以及计算区域范围。经过计算可以得到逐小时观测所对应的通量贡献范围,在此基础上求和平均,得到一段时间内的通量源区平均值。图2c~2d给出了观测期间的平均通量源区分布。可以看到城、郊站点的通量源区都主要分布在东南方向,这主要是由于夏季盛行东南风。综合来看,城、郊站点各通量贡献率源区范围较为接近,城区XJH站80%源区往东南方向可延伸至850 m左右,而西北向大约延伸至500 m。郊区FX站80%源区范围略大于城区XJH站,东南向略超出1 km范围,而西北向也大致延伸至500 m。经统计城、郊观测站点1 km范围总源区贡献率分别为94%和88%,因此基本可以表示通量的贡献区域。利用上海测绘院的GIS数据和下垫面元数据实地调查,统计得到两个站点1 km范围的平均建筑物高度和各类下垫面覆盖率如表1。可见徐家汇平均建筑物高度远高于奉贤站,XJH站以不透水建筑物和路面覆盖为主,而FX站以透水的草地、树木为主。

通量观测仪器需处在常通量层以内来确保通量观测结果可代表局地尺度($10^2 \sim 10^4$ m),不少观测研究表明:常通量层高度大约是平均建筑物高度的2~3倍^[19, 36]。可见,XJH站和FX站的观测高度均基本处于常通量层以内。本文对10 Hz的原始通量观测数据进行了严格的后处理和质量控制,主要包括野点剔除、超声虚温订正、WPL密度订正、2-D坐标旋转、湍流发展充分性等,最终得到半小时平均的通量结果。更为细致的观测仪器和质量控制介绍可见文献[37-38]。

2.2 方法

2.2.1 城市热岛强度和热浪的定义

UHII的定义目前尚无统一标准,以往的研究根据不同的研究目的,分别采用过日平均气温、日最高气温、逐时气温、地表温度等变量的城郊差异来描述。2 m气温可直接影响人体舒适度,本文将利用城区(XJH)与郊区(FX)站点的逐时2 m气温差计算UHII。



注:(徐家汇(XJH)和奉贤(FX)站同时有涡动通量观测)。

图1 上海自动气象站分布图

Fig. 1 Spatial distribution of automated weather stations in Shanghai (XJH and FX sites that have eddy covariance flux observation simultaneously)

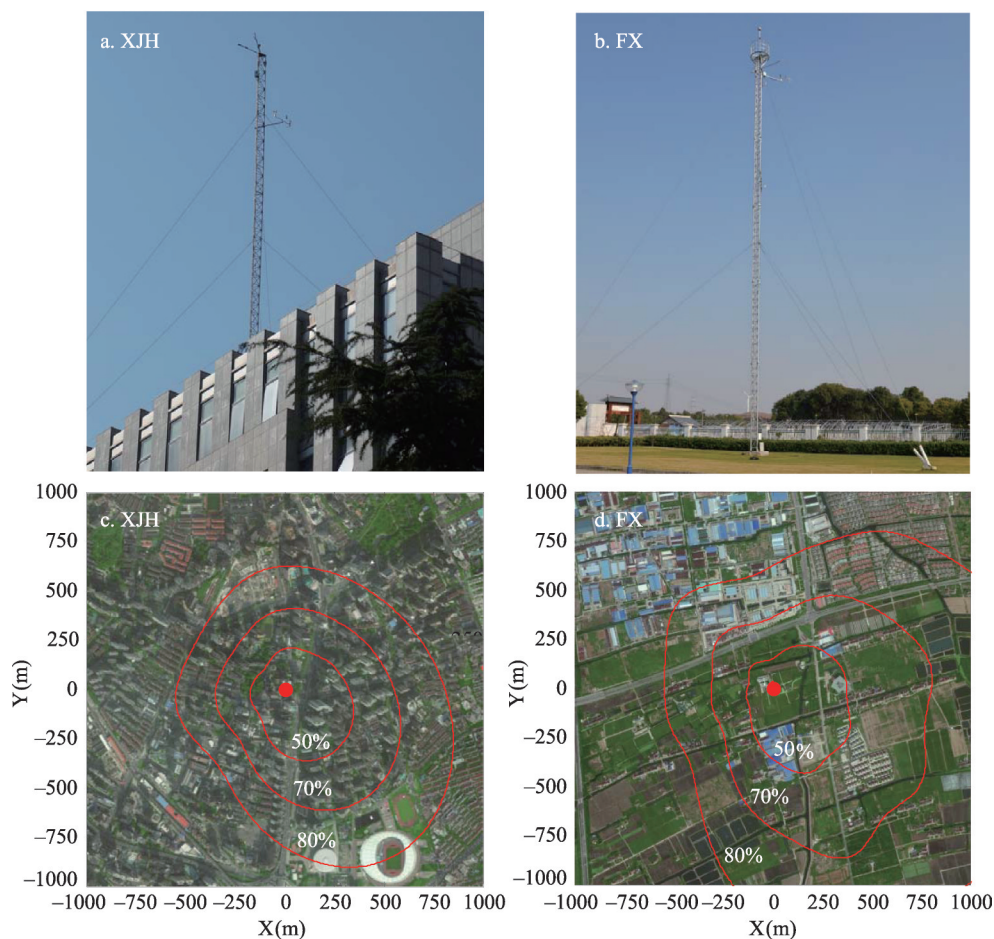


图2 上海城区徐家汇(XJH)和郊区奉贤(FX)站通量观测塔(a, b)与通量塔周边1 km范围下垫面覆盖及源区印痕分布(c, d) (等值线代表源区贡献率从里到外分别为: 50%、70%和80%)

Fig. 2 Flux towers at urban XJH site and suburban FX site (a, b); land cover characteristics within 1 km around sites overlaid with the cumulative flux source area (footprint) (c, d), contours represent the percentage of the source area (from inner to outer ring: 50%, 70% and 80%, respectively)

表1 上海城区徐家汇(XJH)和郊区奉贤(FX)站1 km范围内平均建筑高度及下垫面覆盖率
Tab. 1 Mean building heights and land cover fractions within 1 km around urban XJH and suburban FX sites

通量站	建筑高度(m)	不透水面(%)	建筑(%)	树木(%)	草地(%)	裸土(%)	水体(%)
XJH	36	62	23	4	10	0	1
FX	6	20	14	10	53	2	1

本文选用中国气象局有关热浪的定义,以城区XJH站作为参考站,将连续3 d日最高气温大于等于35℃、日最低气温大于等于25℃定义为一个热浪事件。根据这一标准,挑选出2016-2017两个夏季共4次热浪事件(表2)。

2.2.2 地表能量平衡方程 以往的研究表明^[24, 26],城市热岛和热浪之间相互作用主要原因之一是城、郊地表能量平衡方程各项在热浪期间的不同响应造成。在水平平流不明显的情况下,地表能量平衡方程可以表达为:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S \tag{1}$$

式中: 各通量项的单位均为 W m^{-2} , 其中 Q^* 为净辐射通量, 包括 4 个分量: $Q^* = K\downarrow - K\uparrow + L\downarrow - L\uparrow$, 分别为向下、向上短波辐射通量, 向下、向上长波辐射通量; Q_F 为人为热通量, 城区排放通常大于郊区, 由于人为热源包括建筑、工业、交通、生活等排

放, 其估算具有很大的挑战性; Q_H 为感热通量, 是加热 (当 $Q_H > 0$) 大气的主要热源; Q_E 为潜热通量, 主要来自土壤或植被的蒸发 (蒸腾); ΔQ_s 为储热通量, 包括地表及整个建筑冠层与大气之间的热存储和释放, 目前在城市地区开展储热通量的观测仍十分困难。本文暂时不考虑人为热通量和储热通量在热浪期间的响应, 着重分析直接观测的城、郊辐射四分量、感热、潜热通量的变化特征。

2.2.3 城市热岛与热浪相互作用解析模型 本文将利用 Li 等^[23]提出的一个解析模型来分析城市热岛与热浪之间相互作用的可能物理机制。该模型从简化的二维热量和水汽平流扩散方程出发, 耦合地表能量平衡方程, 以有限范围的城市地表和周边郊区地表与大气之间的水热交换为研究对象, 同时求解地表与大气之间的热量和水汽垂直交换和水平平流过程。包括沿气流的水平 x 方向和垂直 z 方向, 其中郊区处于上方向, x 方向的平流远大于扩散, 因此 x 方向只考虑平流。假设为定常运动以及忽略城郊近地层盛行风速差异, 最终求得的解析模型表达式为:

$$UHII = T_u(x, z) - T_r(z) = (1 - \beta_u/\beta_r)T_{rs} \times f_1(x, z) + g(u_{10})(Q_u - Q_r)f_2(x, z) \quad (2)$$

式中: $T_u(x, z)$ 为城区温度, 为 x 和 z 的函数 ($0 < x < x_u$ 为城区; $x > x_u$ 或 $x < 0$ 为郊区; $z = 0$ 为地表; x_u 代表城市范围); $T_r(z)$ 为郊区温度, 仅为 z 的函数; β_u 和 β_r 分别代表城、郊地表湿度状况, 为实际比湿与饱和比湿的比值, 取值范围为 0~1, 值越大, 表示地表湿度越大。

$$T_{rs}^* = q_{rs}/(c_p/L_v + \alpha\beta_u) \quad (3)$$

式中: q_{rs} 为郊区 (背景) 的实际地表比湿 (kg kg^{-1}); c_p 为大气比热容; L_v 为汽化潜热; α 近似为一常数 ($1.87 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$); $g(u_{10})$ 为一正函数, 且随平均参考高度 (10 m) 风速 (u_{10}) 增大而减小。 $Q_u - Q_r$ 为城、郊有效湍流能量 ($Q = Q_H + Q_E$) 之差; $f_1(x, z)$ 和 $f_2(x, z)$ 为位置 x 和 z 的函数, 是在求解该平流扩散方程中所产生, 且均为正值。

从该解析模型可以看出, 影响 UHII 的因素主要有两点: ① 城、郊地表湿度状态的比值 (β_u/β_r); ② 风速效应 ($g(u_{10})$) 和城、郊有效湍流能量差 ($Q_u - Q_r$) 的组合 (表达式第 2 项), 其正负将决定该项对 UHII 为加强还是减弱作用。在热浪期间, 城、郊的地表湿度状况、有效湍流能量以及风速均将出现与非热浪期不同的特点, 因此该解析可以很好的揭示热浪与 UHII 之间的相互作用。需要注意的是该解析模型的推导假设为定常状态, 且未考虑人为热通量的影响, 因此存在一定的局限性。

3 结果分析

3.1 热浪与 UHII 相互作用的观测分析

图 3 为上海 11 个自动站 2016-2017 年两个夏季的逐日最高气温时间序列以及分月份的高温日数 (日最高气温大于等于 35°C)。可以看到, 除了金山 (JS) 站, 其他站点的日最高气温趋势基本一致, 在 4 次热浪期间日最高气温明显大于非热浪期。统计的各站点

表 2 2016-2017 年夏季上海热浪事件日期及持续天数

Tab. 2 Heat wave periods during summer 2016-2017 in Shanghai

编号	日期	持续天数(d)
1	2016年7月20日-2016年7月30日	11
2	2016年8月13日-2016年8月21日	9
3	2017年7月5日-2017年7月8日	4
4	2017年7月11日-2017年7月28日	18

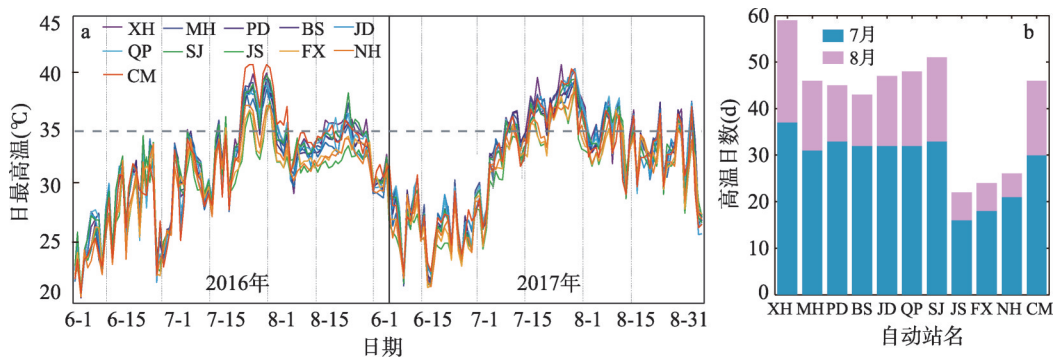


图3 上海11个站点2016-2017两个夏季逐日最高气温曲线图(a)与高温日数直方图(b)
Fig. 3 Daily maximum air temperature curves of 11 AWS sites (a) in Shanghai during summer 2016-2017, (b) histogram of the number of hot days

高温日数均为7月多于8月，6月份均未出现高温日。城区徐汇（XH）站高温日数最多，将近60个高温日；近郊站点（MH、BS、PD、JD）高温日数较为接近，为45 d左右；而JS、FX和NH为高温日数（约25个）最少的3个远郊站点，这可能与这3个站点均处于东南沿海有关。

图4给出热浪和非热浪期间上海城市XJH和郊区FX站夏季平均气温日变化分布。由于6月份没有热浪事件及高温日，这里的夏季仅使用了7-8月的数据。可以看到，除了非热浪期间早晨7-9点左右城市气温略低于郊区外，城市气温均明显高于郊区，表现为明显的城市热岛现象。在热浪期间，城市和郊区气温相较于非热浪期均有明显上升。而从UHII的角度来看，热浪期间UHII明显增强，也即热浪期间城市气温上升幅度相比于郊区更大，表明热浪与城市热岛之间存在相互协同加强效应。另外，在白天午后13时左右，热浪与非热浪期间的城市热岛之差达到最大，夜间差异更小。热浪期间上海UHII在中午前后达到最强，与Tan等^[32]给出的2005-2007年上海夏季UHII以及Founda等^[26]得到的沿海城市希腊雅典2012年夏季UHII是一致的，而与Li等^[24]在北京观察到的夜间UHII最强且热浪与城市热岛之间的相互作用夜间最强有所区别。这种差别可能主要在于局地环流的

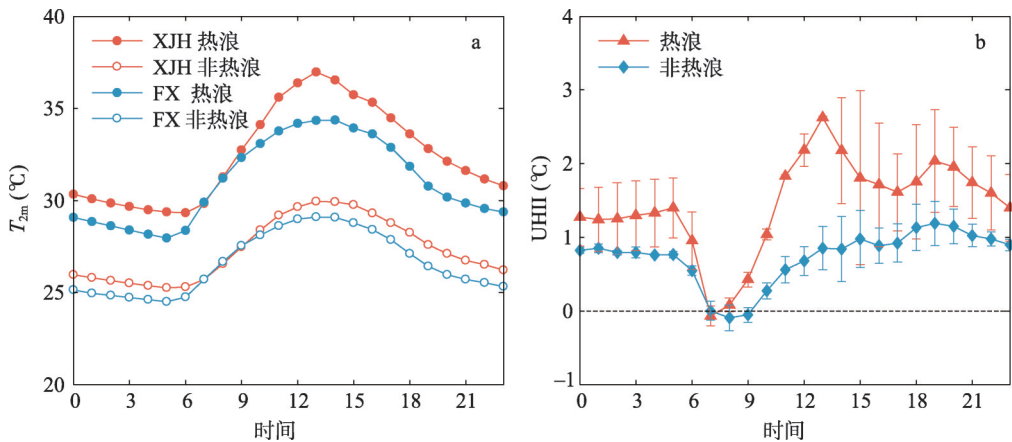


图4 热浪与非热浪期间上海城、郊平均2 m气温(a)、平均城市热岛强度以及标准差平均日变化曲线(b)
Fig. 4 Mean diurnal variations of 2 m air temperature at the urban (XJH) and suburban (FX) sites (a) and the urban heat island index (UHII) under heat wave (HW) and non-heat wave (NHW) conditions (b). The error bars denote the standard deviation.

不同,沿海城市上海和雅典受海陆风平流冷却作用的影响,海水更大的热容量使夜间城郊温差减小,而内陆北京夜间UHII主要受辐射收支的影响。

3.2 城市热岛与热浪相互作用的机理分析

根据解析模型式(1),城、郊地表湿度状态的比值(β_u/β_r)为影响UHII变化的主要因子, β 表示地表实际比湿与饱和比湿的比值,这与相对湿度(RH)的定义一致,只不过RH观测高度为2 m,因此以下将使用自动站观测的近地层2 m RH来代替 β 展开分析。图5给出了热浪与非热浪期间 RH_u/RH_r 的平均日变化分布。可以看到,不管是热浪还是非热浪期间, RH_u/RH_r 均小于1,即城区RH小于郊区,这主要是由于城区大量的不透水下垫面和有限的植被覆盖造成。在非热浪期间, RH_u/RH_r 日变化较为平稳,在0.88~0.96之间。而在热浪期间, RH_u/RH_r 全天均小于非热浪期间的值,在0.71~0.91之间,且日变化幅度加大,特别在午后13时前后与非热浪出现最大的差异,这与UHII在热浪与非热浪最大差异出现时次一致。 RH_u/RH_r 在热浪期间的减小表明城市相对郊区变得更干,从而抑制了蒸发效应,加剧UHII。从解析模型式(1)也可以看出, RH_u/RH_r 在热浪期间减小将增大式(1)第一项,从而使UHII增强。

从解析模型可知,影响UHII的另一主要因素为风速($g(u_{10})$)和城、郊有效湍流能量差(Q_u-Q_r)的组合效应。尽管由于城市下垫面粗糙度大于郊区导致城市风速通常小于郊区,考虑到粗糙度并不随热浪的发生而改变,本文暂时不考虑城、郊风速差异,而将11个站点的平均风速作为盛行风速,给出热浪与非热浪期间10 m风速日变化特征(图6c),以及 Q_u-Q_r 的平均日变化特征(图6a、6b)。从图6c可以看出,除了夜间时段(20-23时、0-1时)热浪期间风速略有增大(0.1 m s^{-1} 以内)外,其他时段风速均明显小于非热浪期间风速,最大降幅出现在中午12时,为 0.5 m s^{-1} 。由于 $g(u_{10})$ 随风速减小而增大,因此 $g(u_{10})$ 在热浪期间增大。从图6b可见,热浪和非热浪期间, Q_u-Q_r 除了13时前

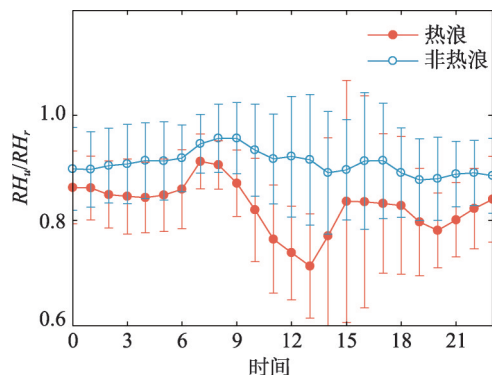


图5 热浪与非热浪期间城、郊2 m相对湿度比值(RH_u/RH_r)及标准差平均日变化曲线

Fig. 5 Mean diurnal variations of the relative humidity ratio (RH_u/RH_r) between the urban and suburban sites under HW and NHW conditions. The error bars denote the standard deviation

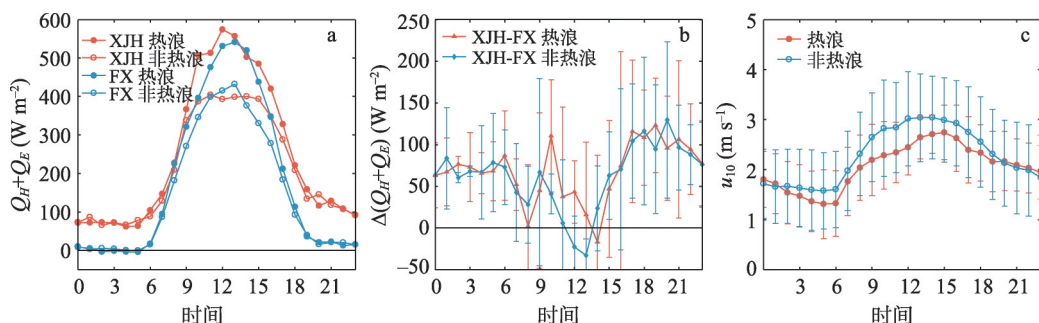


图6 热浪与非热浪期间上海城郊有效湍流能量(Q_H+Q_E)(a)、城郊有效湍流能量差($\Delta(Q_H+Q_E)$)(b)和站点平均10 m风速(u_{10})平均日变化曲线(c)

Fig. 6 The same as Fig. 4, but for the available energy flux (Q_H+Q_E), urban-suburban difference of the available energy flux ($\Delta(Q_H+Q_E)$) and the 10 m wind speed (u_{10})

后短暂的小负值外,均为正值,可见, $g(u_{10})$ 与 $Q_u - Q_r$ 的组合效应也是使热浪期间 UHII 增强。

为了解热浪对城、郊地表能量收支的影响,图7给出热浪与非热浪期间,城市和郊区向下和向上短波辐射通量的日变化情况。可以看到,不管在热浪还是非热浪期间,城郊 $K \downarrow$ 量级都非常接近,而城市 $K \uparrow$ 小于郊区,反映了城市由于建筑物三维结构的多次反射和截获使得城市反照率 (α) 小于郊区 ($K \uparrow = \alpha K \downarrow$)。城市和郊区热浪期间的向下和向上短波辐射通量相比于非热浪期间整个白天均有明显增大,中午增大最明显。这主要与热浪相比非热浪通常为晴朗无云的天气有关。热浪期间城市和郊区 $K \downarrow$ 增幅接近,但总体城市大于郊区; $K \uparrow$ 城市与郊区增幅差别也不大,这可能由于热浪期间城、郊云量变化差异较小。因此,城市和郊区短波辐射在热浪期间的响应差别较小。

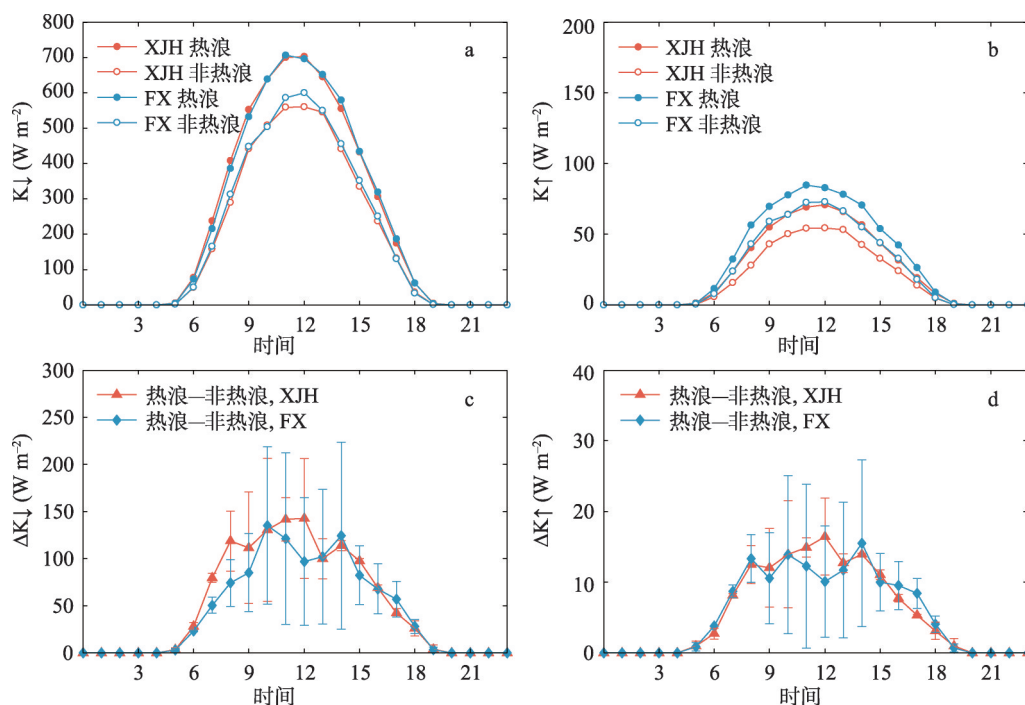


图7 热浪与非热浪期间上海城、郊向下短波辐射($K \downarrow$)(a)、向上短波辐射通量($K \uparrow$)(b)、以及热浪与非热浪之差($\Delta K \downarrow$, $\Delta K \uparrow$)的平均日变化特征(c, d)

Fig. 7 Mean diurnal variations of the (a) downward ($K \downarrow$) and (b) upward short wave radiation flux ($K \uparrow$) at the urban (XJH) and suburban (FX) sites and (c, d) their difference between HW and NHW conditions. The error bars denote the standard deviation.

图8给出热浪与非热浪期间,城市和郊区向下和向上长波辐射通量的日变化情况。可以看到,城市和郊区的向下和向上长波辐射通量在热浪期间全天时段都有明显增强,且城市地区增幅相比郊区更加显著。最大增强时次出现在下午13时,与最高气温出现时次一致。这主要是取决于长波辐射对于温度的高度敏感性,由于热浪期间城郊气温差大于非热浪期间,根据斯蒂芬—玻耳兹曼定律,相应的城郊长波辐射差异在热浪期间也会有所增大。综合辐射四分量的变化特征,即净辐射通量 (Q^*) 的平均日变化特征如图9所示。城市和郊区的白天 Q^* 在热浪期间都是增强的,城区最大增强约 105 W m^{-2} , 郊区增强略小于城区,最大增强约 90 W m^{-2} 。夜间 Q^* 为负值 (亏缺), 且热浪期间城区和郊区的亏

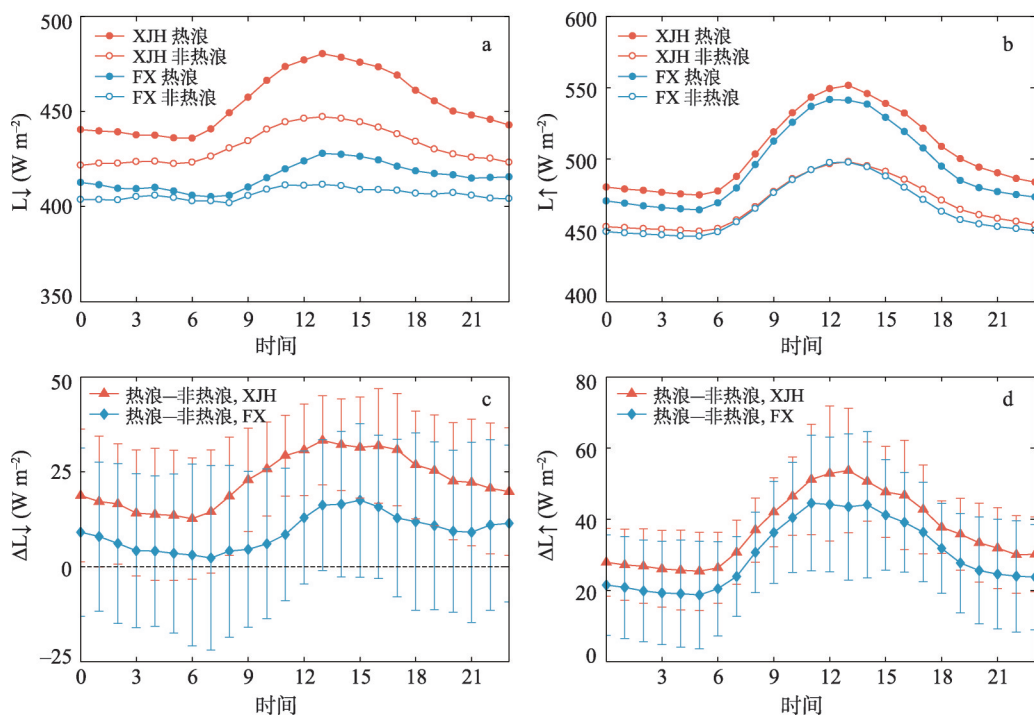


图8 热浪与非热浪期间上海城、郊向下长波辐射($L\downarrow$)(a)、向上长波辐射通量($L\uparrow$)(b)、以及热浪与非热浪之差的平均日变化特征(c, d)

Fig. 8 Mean diurnal variations of the (a) downward ($L\downarrow$) and (b) upward long wave radiation flux ($L\uparrow$) at the urban (XJH) and suburban (FX) site and (c, d) their difference between heat wave (HW) and non-heat wave (NHW) conditions, the error bars denote the standard deviation

缺相近, 且相比非热浪期间都更明显。不管是热浪还是非热浪期间, 城区的 Q^* 全天都大于郊区, 且热浪期间这种效应比非热浪期间更显著 (图 9b), 热浪期间 Q^* 城、郊差最大可达 75 W m^{-2} 左右, 而非热浪期间为 50 W m^{-2} 左右。 Q^* 城、郊差在热浪期间增大导致城区获得更大的辐射通量, 从而对 UHII 产生正反馈。

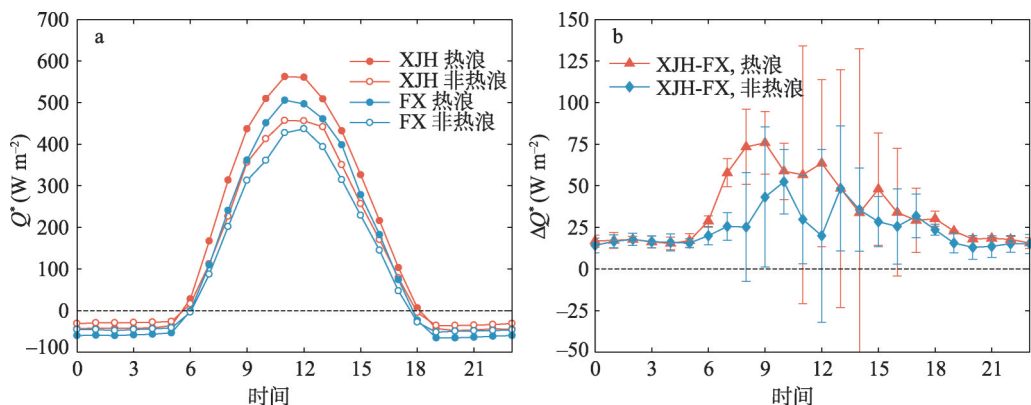


图9 热浪与非热浪期间上海城、郊净辐射通量(Q^*)(a)和城郊差的平均日变化特征(b)

Fig. 9 Mean diurnal variations of the (a) net all-wave radiation flux (Q^*) and (b) their difference between urban and suburban sites. The error bars denote the standard deviation

图10给出城、郊热浪期间感热和潜热通量的改变。可以看到,不管是热浪还是非热浪期间,城市地区由于植被覆盖少以及不透水下垫面多,感热通量都明显大于潜热通量。而在郊区感热和潜热通量量级较为接近,潜热略大于感热通量。城区夜间由于大量白天储存的热通量释放,使感热通量全天为正值,夜间量级可达到 $80\sim 100\text{ W m}^{-2}$ 左右,而郊区夜间的感热通量接近0且略为负值,城区感热通量全天都明显大于郊区。城区和郊区的潜热通量在夜间较为接近,均为略大于0。而白天则是城区潜热通量明显小于郊区。城、郊感热和潜热通量的这种分配特征综合效应使城、郊有效湍流能量差(Q_u-Q_r)在夜间为恒定的正值,而在白天正值减小,在13时前后还出现短时的负值(图6b)。

城区热浪期间感热通量全天时段都增大,且在午后增大最为显著,可达 150 W m^{-2} ;郊区热浪期间感热通量在白天明显增大,可达到将近 100 W m^{-2} ,而在夜间略有减小,这与北京乡村热浪期间感热通量在全天减小不同^[24]。城市地区感热增大幅度大于郊区,这主要是由于潜热通量在热浪期间相比于非热浪期间的变化幅度相对感热通量要小,这与北京地区潜热通量变化幅度大于感热通量不相同^[24]。感热通量在热浪期间增大可能和风速变化从而使温度垂直梯度发生变化有关^[24]。热浪期间城市地区的潜热通量变化较为波动,基本是略有降低,幅度在 25 W m^{-2} 以内,仅在中午12时,下午15时左右有所增大,但增幅也小于郊区,这主要由于城市地区植被覆盖少和不透水面多,可用于蒸发的水分有限;郊区存在较多的植被覆盖,潜热通量在热浪期间表现为较明显的增大,由此可见,热浪对城、郊地表能量分配的影响存在差异:热浪使得城区感热增幅大于郊区,而郊区潜热增幅明显,城区潜热略有减小,从而加剧了UHII。

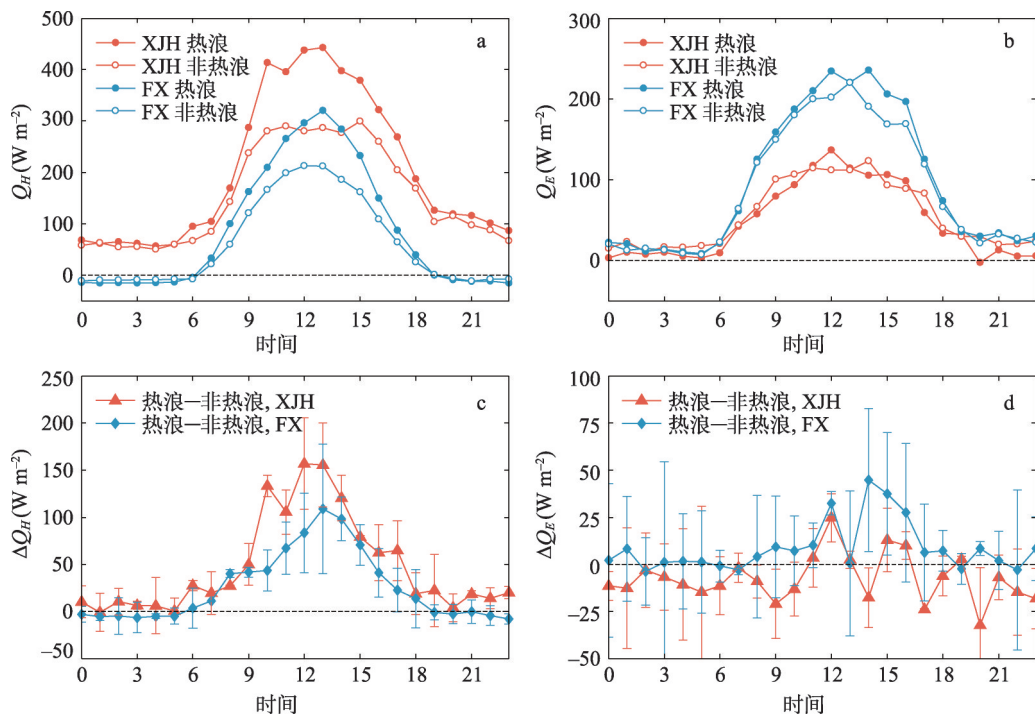


图10 热浪与非热浪期间上海城、郊感热($K\downarrow, Q_H$)(a)、潜热通量(Q_E)(b)、以及热浪与非热浪之差($\Delta Q_H, \Delta Q_E$)的平均日变化特征(c, d)

Fig. 10 Mean diurnal variations of the (a) sensible heat(Q_H) and (b) latent heat flux (Q_E) at the urban (XJH) and suburban (FX) sites and (c, d) their difference between HW and NHW conditions. The error bars denote the standard deviation

为进一步分析城、郊地表能量收支各项响应的差异, 图 11 给出夏季热浪与非热浪期间向下和向上短波辐射、向下和向上长波辐射, 向下和向上总辐射、净全波辐射, 感热、潜热以及有效湍流能量(感热与潜热通量之和)平均值直方图。热浪与非热浪期间, 城、郊之间的向下短波辐射通量比较接近(差距在 10 W m^{-2} 以内), 特别是热浪期间差距进一步缩小。城郊向下长波辐射差异在热浪期间有较明显增大, 与热浪期间增强的城市热岛一致。向下长波和短波辐射响应总体效应是城市地区总的入射辐射在热浪期间增加更明显。向上短波辐射通量在热浪与非热浪期间相近, 均为城市小于郊区。而向上长波辐射的响应与向下长波辐射较为一致, 热浪期间城市增强更加明显。综合效应是热浪期间总的向上辐射增加更明显。因此净全波辐射相比于向下总辐射城郊差异变小, 但热浪期间仍稍大于非热浪, 从而使 UHI 增强。

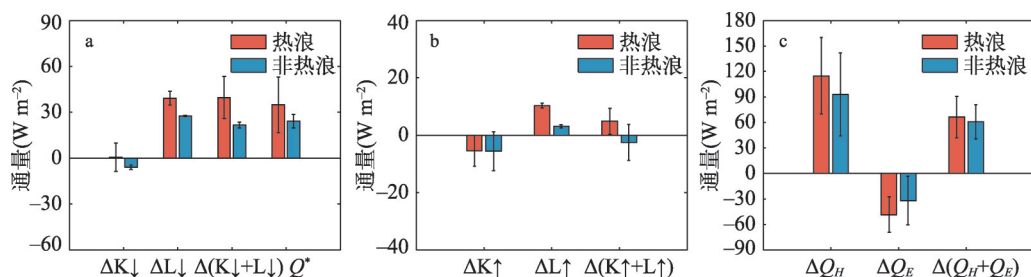


图 11 热浪与非热浪期间各通量平均值直方图(误差棒代表标准差)

Fig. 11 The mean differences in flux components (The error bars denote the standard deviation)

热浪期间城市地区接收的净全波辐射通量的增大也使得感热通量增大, 而城市地区由于可供蒸发的水分远小于郊区, 潜热通量在热浪期间小于郊区的幅度则增大, 二者的综合效应是使得热浪期间 UHI 的加强, 有力解释了热浪与城市热岛之间的协同加强效应。另外可以注意到热浪与非热浪间有效能量 ($Q_H + Q_E$) 城郊差异较小, 这与解析模型理论是一致的, 即热浪与城市热岛的相互作用取决于城郊可用于蒸发的水分的多少, 而与有效能量的联系相对较小。

4 结论与讨论

4.1 结论

利用 2016-2017 年夏季 (6-8 月) 上海城区和郊区 11 个常规自动气象站的逐时气温、风速、相对湿度资料、城区 (XJH) 和郊区 (FX) 涡动相关地表通量观测资料以及一个二维平流扩散解析模型对比分析了热浪与非热浪期间 UHI 的差异, 并从城、郊地表湿度、风速和地表能量收支等方面探讨了热浪与城市热岛相互作用的物理机制。主要结论为:

(1) 热浪和非热浪期间均表现出明显的城市热岛现象, 且热浪期间 UHI 明显增强, 表现出热浪和城市热岛之间的协同加强效应, 该效应在白天 (午后 13 时达最大) 大于夜间。

(2) 对解析模型中给出的影响 UHI 的两个主要因素: ① 城、郊地表湿度状态比值 (RH_u/RH_r)、② 风速和城、郊有效湍流能量差 ($Q_u - Q_r$) 的组合效应进行分析发现, 热浪期间 RH_u/RH_r 全天均小于非热浪期间的值, 表明热浪期间城区地表相对郊区变得更干, 从而抑制了蒸发作用, 加剧了城市热岛; 热浪期间平均 10 m 风速相对非热浪期间明显减小, 平流降温效应减弱, $Q_u - Q_r$ 在热浪和非热浪期间相近, 均为正值, 二者的组合效应使得热浪期间的 UHI 增强。

(3) 热浪期间城、郊向下和向上短波、长波辐射通量均有增大,除向上短波辐射增幅无明显差异外,其他3个辐射分量均为城区增幅大于郊区,综合效应使得热浪期间净辐射通量(Q^*)城郊差大于非热浪期,平均日最大差异分别约为 75 W m^{-2} 和 50 W m^{-2} 。城郊净辐射通量差异在热浪期间增大导致城区获得更大的辐射输入,从而增强了 UHII。

(4) 由于城区植被覆盖少和不透水下垫面多,热浪期间城区感热通量全天均明显增大,午后最大增幅约为 150 W m^{-2} ,郊区增幅小于郊区,且夜间略有减小;热浪期间城区潜热通量总体略为降低,而郊区潜热通量增幅较明显,午后最大增幅可达 45 W m^{-2} ,这种感热和潜热通量分配的改变加剧了城市热岛强度。

4.2 讨论

本文首先从观测的角度认识了城市热岛与热浪之间的协同加强现象,继而借助一个解析模型从地表湿度、风速、地表能量平衡的角度揭示了热浪与城市热岛协同加强的物理机制,这与以往的研究仅分析现象相比较为新颖。然而本文仅对两个夏季共4次热浪事件进行短期分析,且未分析人为热和储热通量的响应,研究结果是否具有普适性需要在将来收集更长期全面的资料进行深入研究。本研究与国内外其他城市的研究具有相似结论,例如在中国北京^[24]、美国巴尔地摩^[23]、纽约^[39]以及希腊雅典^[26],均发现城市热岛与热浪之间的协同效应。然而,也有一些研究发现这种协同作用在有些城市并不显著或不存在。例如最近的一项研究^[40]利用模式模拟了美国50个城市热浪与城市热岛之间的相互作用,发现存在很大的空间差异:处于温带地区的城市存在明显的日间协同作用,而处在干旱区域的城市协同作用则不明显。这种空间差异性可能的主要原因在于城郊地表湿度状况的差异性。此外,地表温度由于与地表能量平衡具有更为直接的关系,利用城郊地表温度差表示的地表城市热岛强度同样具有重要指示意义,在后续工作中有必要利用遥感反演地表温度数据进行综合对比分析。

参考文献(References)

- [1] Russo S, Dosio A, Graversen R G, et al. Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015, 119(22): 12500-12512.
- [2] Mora C, Dousset B, Caldwell I R, et al. Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 501-506.
- [3] Tan Jianguo, Huang Jiaxin. The impacts of heat waves on human health and its research methods. *Climatic and Environmental Research*, 2004, 9(4): 680-686. [谈建国, 黄家鑫. 热浪对人体健康的影响及其研究方法. 气候与环境研究, 2004, 9(4): 680-686.]
- [4] Chen Qian, Ding Mingjun, Yang Xuchao, et al. Spatially explicit assessment of heat health risks using multi-source data: A case study of the Yangtze River Delta region, China. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(11): 1475-1484. [陈倩, 丁明军, 杨续超, 等. 长江三角洲地区高温热浪人群健康风险评价. 地球信息科学学报, 2017, 19(11): 1475-1484.]
- [5] Zaitchik B F, Macalady A K, Bonneau L R, et al. Europe's 2003 heat wave: A satellite view of impacts and land-atmosphere feedbacks. *International Journal of Climatology*, 2010, 26(6): 743-769.
- [6] Knutson T R, Zeng F R, Wittenberg A T. The extreme March-May 2012 warm anomaly over the eastern United States: global context and multimodel trend analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(9): S13-S17.
- [7] Xia J, Tu K, Yan Z, et al. The super-heat wave in eastern China during July-August 2013: A perspective of climate change. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(3): 1291-1298.
- [8] Ma S, Zhou T, Stone D, et al. Attribution of the July-August 2013 heat event in central and eastern China to anthropogenic greenhouse gas emissions. *Environmental Research Letters*, 2017, 12: 054020.
- [9] Chen Min, Geng Fuhai, Ma Leiming, et al. Analyses on the heat wave events in Shanghai in recent 138 years. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(2): 597-607. [陈敏, 耿福海, 马雷鸣, 等. 近138年上海地区高温热浪事件分析. 高原气象, 2013, 32(2): 597-607.]
- [10] Cao Chang, Li Xuhui, Zhang Mi, et al. Correlation analysis of the urban heat island effect and its impact factors in China. *Environmental Science*, 2017, 38(10): 3987-3997. [曹畅, 李旭辉, 张弥, 等. 中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析. 环境科学, 2017, 38(10): 3987-3997.]

- [11] Meehl G A, Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 2004, 305: 994-997.
- [12] Robinson P J. On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40: 762-775.
- [13] Matsumura S, Sugimoto S, Sato T. Recent intensification of the Western Pacific subtropical high associated with the East Asian summer monsoon. *Journal of Climate*, 2015, 28(4): 2873-2883.
- [14] He C, Zhou T, Lin A, et al. Enhanced or weakened western north pacific subtropical high under global warming? *Scientific Reports*, 2015, 5: 16771.
- [15] Peng Baofa, Shi Yishao, Wang Hefeng, et al. The impacting mechanism and laws of function of urban heat islands effect: A case study of Shanghai. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1461-1471. [彭保发, 石忆邵, 王贺封, 等. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律: 以上海市为例. *地理学报*, 2013, 68(11): 1461-1471.]
- [16] Oke T R. The energetic basis of the urban heat-island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, 108: 1-24.
- [17] Grimmond S. Urbanization and global environmental change: Local effects of urban warming. *Geographical Journal*, 2007, 173: 83-88.
- [18] Liu Yue, Shintaro Goto, Zhuang Dafang, et al. Urban surface heat flux inversion based on infrared remote sensing and the relationship with land cover. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 101-112. [刘越, Shintaro G, 庄大方, 等. 城市地表热通量遥感反演及与下垫面关系分析. *地理学报*, 2012, 67(1): 101-112.]
- [19] Roth M. Review of atmospheric turbulence over cities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2000, 126: 941-990.
- [20] Miao S, Chen F, Lemone M A, et al. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(3): 484-501.
- [21] Zhao L, Lee X, Smith R B, et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 2014, 511: 216-219.
- [22] Zhou D, Zhao S, Zhang L, et al. The footprint of urban heat island effect in China. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11160.
- [23] Li D, Bou-Zeid E. 2013: Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves: The impact in cities is larger than the sum of its parts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013, 52: 2051-2064.
- [24] Li D, Sun T, Liu M, et al. Contrasting responses of urban and rural surface energy budgets to heat waves explain synergies between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, 2015, 10: 054009.
- [25] Li D, Sun T, Liu M, et al. Changes in wind speed under heat waves enhance urban heat islands in the Beijing metropolitan area. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2016, 55: 2369-2375.
- [26] Founda D, Santamouris M. Synergies between urban heat island and heat waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 10973.
- [27] Sun T, Kotthaus S, Li D, et al. Attribution and mitigation of heat wave-induced urban heat storage change. *Environmental Research Letters*, 2017, 12: 114007.
- [28] Scott A A, Waugh D W, Zaitchik B F. Reduced urban heat island intensity under warmer conditions. *Environmental Research Letters*, 2018, 13: 064003.
- [29] Yue Wenze, Xu Jianhua. Impact of human activities on urban thermal environment in Shanghai. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(3): 247-256. [岳文泽, 徐建华. 上海市人类活动对热环境的影响. *地理学报*, 2008, 63(3): 247-256.]
- [30] Miao Junfeng. An overview of numerical studies of interactions of urban heat island and sea breeze circulations. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2014, 37(4): 521-528. [苗峻峰. 城市热岛和海风环流相互作用的数值模拟研究进展. *大气科学学报*, 2014, 37(4): 521-528.]
- [31] Gu Wen, Zhang Jing, Tan Jianguo, et al. Characteristics and circulation background of Shanghai summer sea breeze front and its induced convection. *Journal of Tropical Meteorology*, 2017, 33(5): 644-653. [顾闻, 张晶, 谈建国, 等. 上海夏季海风锋及其触发对流的时空分布和环流背景分析. *热带气象学报*, 2017, 33(5): 644-653.]
- [32] Tan J G, Zheng Y, Tang X, et al. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology*, 2010, 54: 75-84.
- [33] Kormann R, Meixner F X. An analytical footprint model for non-neutral stratification. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99: 207-224.
- [34] Zhu Mingjia, Zhao Qianyi, Liu Shaomin, et al. Analysis of the characteristics of turbulent flux and its footprint climatology at an agricultural site. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(12): 1313-1325. [朱明佳, 赵谦益, 刘绍民, 等. 农田下垫面观测通量的变化特征及其气候学足迹分析. *地球科学进展*, 2013, 28(12): 1313-1325.]
- [35] Kotthaus S, Grimmond C S B. Energy exchange in a dense urban environment (Part II): Impact of spatial heterogeneity of the surface. *Urban Climate*, 2014, 10: 281-307.

- [36] Zou J, Liu G, Sun J, et al. The momentum flux gradient relations derived from field measurements in the urban roughness sublayer in three cities in China. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2016, 120: 10797-10809.
- [37] Ao X Y, Grimmond C S B, Liu D W, et al. Radiation fluxes in a business district of Shanghai, China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2016, 55(11): 2451-2468.
- [38] Ao X Y, Grimmond C S B, Chang Y Y, et al. Heat, water and carbon exchanges in the tall megacity of Shanghai: Challenges and results. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(14): 4608-4624.
- [39] Ramamurthy P, Bou-Zeid E. Heatwaves and urban heat islands: A comparative analysis of multiple cities. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2017, 122: 168-178.
- [40] Zhao L, Oppenheimer M, Zhu Q, et al. Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, 2018, 13: 034003.

Synergistic interaction between urban heat island and heat waves and its impact factors in Shanghai

AO Xiangyu^{1,2,4}, TAN Jianguo^{3,4}, ZHI Xing⁵, GUO Jibing⁶, LU Yiwen¹, LIU Dongwei¹

(1. Shanghai Ecological Forecasting and Remote Sensing Center, Shanghai 200030, China; 2. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Shanghai Climate Centre, Shanghai 200030, China; 4. Shanghai Key Laboratory of Meteorology and Health, Shanghai 200030, China;

5. Department of Science and Technology Development, Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030, China; 6. Fengxian Meteorological Service, Shanghai Meteorological Service, Shanghai 201416, China)

Abstract: Under the background of global warming, heat waves are expected to be more frequent and long lasting. Cities endure greater risk under heat wave events because of the pre-existing urban heat island. However, research on the interaction between heat wave and urban heat island is still lacking. Based on hourly data of air temperature, wind speed, relative humidity, and eddy covariance energy flux data from Shanghai urban (XJH) and rural site (FX) during two summers (June-August) in 2016-2017, the difference of urban heat island (UHI) between heat wave (HW) and non-heat wave (NHW) conditions is analysed. In addition, an advection-diffusion analytical model has been used to unravel the mechanism of the interaction between UHI and HW. Results show that the UHI intensity is obviously enhanced during HWs, and the enhancement is stronger during daytime than that of nighttime, which indicates the synergistic effect between UHI and HW. The relative humidity ratio of urban and suburban areas during HWs significantly decreases compared with NHW conditions, indicating the urban surface becomes even drier than suburban areas during HWs that suppresses evaporation and intensifies UHI intensity. The mean wind speed also has an obvious decrease, leading to weaker advection cooling effect, which has a positive effect on UHI intensity. The increase of net radiation at the urban site is larger than that of the suburban site during HWs so that urban area receives more radiation input. Due to low vegetation cover and more impervious surfaces, the latent heat flux at the urban site has a slight decrease while it has an obvious increase at the suburban site. The increase of the urban sensible heat flux is larger than that of the suburban site. This change of the partition between sensible and latent heat flux also exacerbates the UHI intensity. This study has important implications for cities to cope with intensified thermal risks.

Keywords: urban heat island; heat wave; analytical model; radiation flux; sensible heat flux; latent heat flux