

徐伟,张蕾,漆梁波,等,2019.地面风对上海城市热岛影响的观测分析[J].气象,45(9):1262-1277. Xu W, Zhang L, Qi L B, et al, 2019. Observation analysis of the influence of surface wind on urban heat island in Shanghai[J]. Meteor Mon, 45(9):1262-1277(in Chinese).

地面风对上海城市热岛影响的观测分析*

徐 伟^{1,2} 张 蕾¹ 漆梁波¹ 刘冬韡¹ 张仕鹏² 曹丹萍¹

1 上海市气象局,上海 200030

2 南京大学,南京 210046

提 要: 首先利用上海 77 个区域站 2011—2014 年逐时气温和风资料,研究了地面风对上海城市热岛(urban heat island, UHI)的影响及 UHI 季节性空间分布特征的成因,并从海陆热力差异初步揭示了向岸风对热岛强度(urban heat island intensity, I_{UHI})的影响。其次利用上海 7 个国家站 1961—2014 年逐月气温和风资料,研究了上海各季地面风速与 I_{UHI} 的年际变化关系。结果表明:(1)UHI 中心出现的位置与风向、风速有密切的关系,特别是夜间 UHI 中心有向城市下风方向漂移的特征,其平均漂移风速阈值为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,UHI 区域随风速增大向城市下风方向延伸, I_{UHI} 随风速的增大而减小。(2)上海各季夜间 UHI 特征明显,尤以秋冬季最为明显,春季次之,夏季最弱。春夏季夜间 UHI 中心出现在城区西北侧,而秋冬季夜间 UHI 中心稳定在城区,表现为典型 UHI。各季白天均表现为下风方大范围增暖现象。季节地面盛行风决定了 UHI 季节性空间分布特征。(3)白天向岸风具有抑制升温作用(春夏季最为明显),受其影响气温大值区易出现在内陆地区,春夏季城市偏东区 I_{UHI} 小于偏西区;夜间向岸风具有抑制降温作用(秋冬季最为明显),受其影响秋冬季东部沿海地区出现明显增暖且城市偏东区 I_{UHI} 大于偏西区。海陆热力差随季节不同和盛行风风速大小决定了向岸风这种作用的大小及影响范围。(4)各季年平均地面风速与 I_{UHI} 均呈显著负相关,1961—2014 年上海各季风速均表现为递减趋势(秋冬季最明显),为 I_{UHI} 增大提供有利条件。21 世纪以来各季 I_{UHI} 均呈现减缓特征(夏秋季最明显),风速并不是导致 I_{UHI} 减缓的主要因素。

关键词: 城市热岛,地面风,上海,向岸风,海陆热力差

中图分类号: P461, P425

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.09.007

Observation Analysis of the Influence of Surface Wind on Urban Heat Island in Shanghai

XU Wei^{1,2} ZHANG Lei¹ QI Liangbo¹ LIU Dongwei¹ ZHANG Shipeng² CAO Danping¹

1 Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030

2 Nanjing University, Nanjing 210046

Abstract: Using the hourly air temperature and wind data of 77 regional meteorological stations from 2011 to 2014, the influence of surface wind on urban heat island (UHI) in Shanghai and the cause of seasonal spatial distribution of UHI were studied. The influence of onshore wind on urban heat island intensity (I_{UHI}) was preliminarily revealed from sea-land thermal difference. Besides, the interannual variation of surface wind speed and I_{UHI} in different seasons in Shanghai was studied based on the monthly air temperature and wind data of seven national meteorological stations from 1961 to 2014. The main conclusions are as follows: (1) The location of UHI center is closely related to wind direction and wind speed. The UHI center at night has the feature of moving to the leeward side of urban area when the average wind speed threshold is $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. With the increase of wind speed, the UHI area extends to the leeward side of city,

* 华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ201607)资助

2019 年 2 月 2 日收稿; 2019 年 7 月 9 日收修定稿

第一作者:徐伟,主要从事城市气象和气候变化研究. Email: ovenxuwei@163.com

but the I_{UHI} decreases. (2) UHI characteristics are obvious in Shanghai at night, especially in autumn and winter, followed by spring and summer in order. UHI center appears in the northwest of urban areas at night in spring and summer, while UHI center is stabilized in urban areas at night in autumn and winter, showing typical UHI. In the daytime in each season, there is a large-scale warming phenomenon in the downwind area. Seasonal surface prevailing wind determines the seasonal spatial distribution characteristics of UHI. (3) Onshore wind inhibits warming in the daytime, especially obvious in spring and summer. Affected by this phenomenon, the high temperature tends to appear in inland area. The I_{UHI} is larger in the western urban area than in the eastern urban area in spring and summer. Onshore wind inhibits cooling at night, which is the most obvious and caused obvious warming in the eastern coastal areas in autumn and winter. The I_{UHI} is larger in the eastern urban area than that in the western urban area in autumn and winter. Both the land-sea thermal difference in different seasons and the prevailing wind speed determine the magnitude and impact scope of the onshore wind. (4) The average annual surface wind speed in each season has a significant negative correlation with the corresponding I_{UHI} . The seasonal wind speed shows a decreasing trend (the most obvious in spring and winter) from 1961 to 2014 in Shanghai, which is good for I_{UHI} increasing. Since the 21st century, the increasing trend of I_{UHI} in all seasons has slowed down (the most obvious in summer and autumn), but wind speed is not the main factor causing the increasing trend of I_{UHI} to slow down.

Key words: urban heat island (UHI), surface wind, Shanghai, onshore wind, land-sea thermal difference

引 言

随着全球经济发展,城市化进入了前所未有的发展阶段,预计2050年全球有超过66%的人口将居住在城市(UN Department of Economic and Social Affairs, 2014),城市化对城市气候和城市环境的影响已经受到越来越多的关注(陈燕和蒋维楣, 2007;赵娜等,2011;吴风波和汤剑平,2015;王志春等,2017)。城市主要由于其地表材质和建筑物的空间结构,具有蓄能高的特点,因此其温度要比周围地区温度偏高(Oke, 1982),这种现象被称为城市热岛(urban heat island, UHI)。UHI虽然并不是直接造成自然灾害的天气现象(如强台风、暴雨、强对流等灾害性天气),但是往往会通过改变局地能量平衡、水循环过程、大气边界层结构、污染传播和扩散规律,从而对人类的生产和生活产生间接的危害(寿亦萱和张大林,2012)。

上海作为一座国际化大都市,其UHI的变化特征显著。Zhao et al(2016)研究指出上海城市化进程增强了其UHI效应。最新的研究(沈钟平等, 2017;徐伟等,2018)表明:1961—2013年上海城市热岛强度(urban heat island intensity, I_{UHI})整体上呈上升趋势, I_{UHI} 递增率达 $0.15\sim 0.17^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,冬

季 I_{UHI} 、 I_{UHI} 日变化均最大,秋季相当,春季次之,夏季最小;受大气环流季节转换和局地海陆风的影响,UHI位置在秋冬季偏东南方向,春夏季偏西北方向。Tan et al(2010)分析发现UHI导致上海城市地区比乡村地区的高温日数和热浪现象要多,夏季城市死亡率比周边地区要高。另外,徐伟等(2018)研究表明21世纪以来上海 I_{UHI} 呈现出的减缓特征与全球气候变暖减缓的趋势一致。过去关于上海UHI的时空变化特征有了一定研究成果(邓莲堂等, 2001; Cui et al, 2007; Zhang et al, 2010; 沈钟平等, 2017; 徐伟等, 2018),但是对其形成机制以及其与城市气候其他要素的关系有待进一步研究。

导致UHI产生和变化的因素主要分为城市化的人类因素和局地天气气候条件两类(林学椿和于淑秋,2005)。人类因素以下垫面性质的改变(Arnfield, 2003; Ryu and Baik, 2012; Zhao et al, 2016)、人为热(Kato and Yamaguchi, 2005; Menberg et al, 2013)、过量温室气体排放以及大气污染(Akbari et al, 2011; Aslam et al, 2017)等最为重要;局地天气气候条件则包括天气形势、气温、风、云量、湿度等(Che Ani et al, 2009; 丁硕毅等, 2015)。许多研究(Magee et al, 1999; Morris et al, 2001; 陈志等, 2004; Kim and Baik, 2005; 李兴荣等, 2008)指出风是影响UHI的重要气象因子。当盛行

风较弱时,大气层结稳定,不利于城市热量的散发,有利于典型 UHI 的形成,尤其是在晴空弱风的夜间。也有研究(Gallo et al, 1993; Li, 1998; Weng, 2003)认为,在弱风的晴天,UHI 的形成、发展及空间分布主要取决于下垫面介质和城市格局变化;但如果出现大风天气,UHI 中心的变化则与风速、风向有密切的关系。丁金才等(2002)研究发现风向是影响上海夏季 UHI 范围最主要的气象因子,地面风造成 UHI 向下风方扩展。戎春波等(2009)观测发现苏州夏季 I_{UHI} 与风向有关,城区风向为西风时的 I_{UHI} 大于东风时的 I_{UHI} ,而城区 I_{UHI} 与风速关系不明显。许多数值模拟研究(霍飞和陈海山,2011;姜润,2012;成丹,2013)也得出 UHI 向城市下风方向延展的结论。Clarke(1969)将城市下风方增暖归因于边界层中“尾羽层”的存在,后续的研究(Martilli, 2002; Miao et al, 2009; Hu et al, 2016)也认为 UHI 与城市边界层的变化确实存在密切联系,而风可能是 UHI 和边界层的一个重要连接因子。

季风是由海陆分布、大气环流、大陆地形等因素造成的大范围盛行的、风向随季节变化显著的风系。Gedzelman et al(2003)分析发现季风对沿海城市纽约的 I_{UHI} 与 UHI 地理分布有重要影响。孙继松和舒文军(2007)认为北京 UHI 对不同季节降水分布的影响中季风起了关键作用。江学顶等(2007)分析发现广州 UHI 以 3 个月为周期的变化特征与季风气候特点有较大相关性。徐伟等(2018)研究指出上海 UHI 季节性空间分布特征与季风存在一定联系。另外,上海属于沿海城市,与内陆城市不同,除了受 UHI 的影响,还不可避免受海陆热力差异的影响。海陆热力差可能通过地面风使得上海 UHI 表现独特。

关于 UHI 与地面风的研究已有很多,但关于 UHI 与季节地面盛行风的研究缺少。由于过去观测资料有限,国内关于 UHI 与地面风的已有研究多基于数值模拟,缺乏翔实的观测资料比对验证。沈钟平等(2017)指出 UHI 的精细化特征在常规资料(低分辨率资料)中无法体现或并不明显。基于以上原因,本文将采用一套高分辨率气温和风观测数据集,研究地面风对上海 UHI 的影响,从季风(本文将季风定义为各季节地面盛行风)对 UHI 影响的角度阐述上海 UHI 季节性变化特征形成的原因,为 UHI 的精细化监测、预报、预警服务提供科学依据。

1 数据

本文采用上海 77 个加密区域气象自动站(简称区域站)2011—2014 年逐时气温和 10 min 平均风向、风速资料,所选站点与徐伟等(2018)采用的站点相同,按照徐伟等(2018)的研究将上海外环以内作为城市区,27 个区域站作为城市站,7 个区域站作为参考站。为研究上海 I_{UHI} 与风速的年际变化关系,采用上海 7 个国家站 1961—2014 年月平均气温和风速资料。站点位置见图 1 和图 2。

另外采用 NOAA OI SST V2 数据集(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>)2011—2014 年日平均海表温度资料(水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$),用于计算各站气温与近海海表温度之间的相关系数。选取 $30.50^\circ \sim 31.75^\circ \text{N}$ 、 $121.00^\circ \sim 122.75^\circ \text{E}$ 的海域作为近海海域(图 2)。

2 方法

2.1 城区划分

徐伟等(2018)通过模糊 C 均值聚类法将 77 个区域站分为三类:偏东近海站为一类、城区站为一类、偏西内陆站为一类(图略),认为东西部气温特征存在明显差异,可能与距离海洋的远近有密切关系。为证明两者之间的联系,计算各站日平均气温与近海日平均海温的相关系数,用反距离加权法(IDW)进行空间插值(图 3),从图上可以发现:两者相关系数均达 0.9 以上,表现为显著正相关;东部沿海往西部内陆相关系数依次递减,反映东部近海比西部内陆更易受海气影响。城区同样存在东西差异,反映海气对城区不同位置的影响差异。相关系数 0.912 线经过城区中心,将城区分为面积相近的两区域,故定义以此线为界,将城区划分为偏东区(15 个站)和偏西区(12 个站),用于 3.4 节海陆热力差异对 I_{UHI} 影响的研究。

2.2 热岛强度定义

按照徐伟等(2018)的研究选择相同的 7 个参考站(图 1)。将城市站气温的平均值减去所有参考站气温的平均值的差值定义为热岛强度(I_{UHI})。即

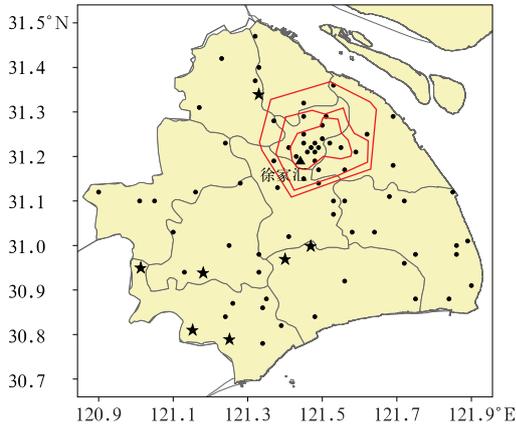


图 1 77 个区域站位置(徐伟等,2018)
 (●和★代表区域站,其中★为参考站;
 三条红线代表上海的三条高架路,
 由里往外依次为内环、中环、外环,下同)
 Fig.1 Locations of 77 regional stations
 (Xu et al, 2018)

[Both the dots and the pentagrams represent the regional stations, of which the pentagrams also represent reference stations; three red lines represent three elevated roads (the inner ring, the middle ring and the outer ring) in Shanghai, which is not annotated in the following figures]

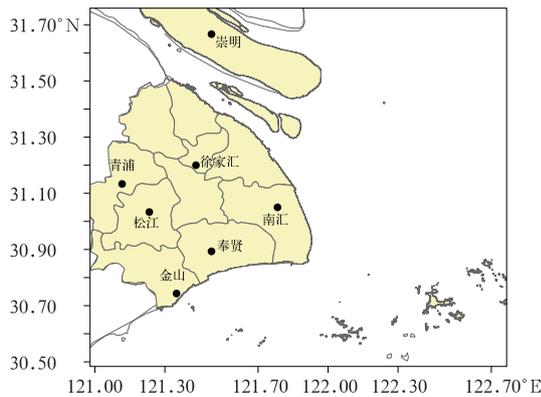


图 2 7 个国家站位置
 (图中海域为近海海域)

Fig.2 Locations of seven national stations
 (The sea area given in the figure is the offshore area selected by the article)

$$I_{UHI\text{城区}} = \frac{1}{27} \sum_{i_1=1}^{27} T_{i_1} - \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 T_j \quad (1)$$

$$I_{UHI\text{城市偏东区}} = \frac{1}{15} \sum_{i_2=1}^{15} T_{i_2} - \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 T_j \quad (2)$$

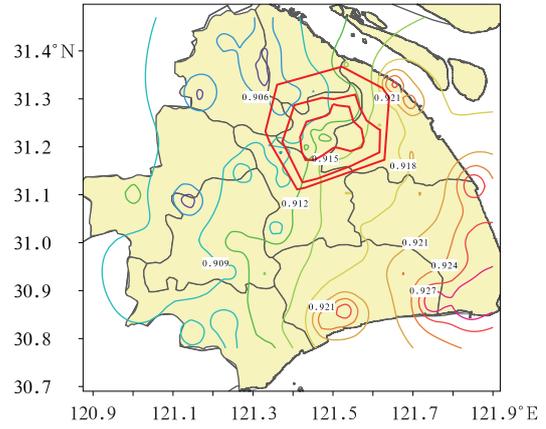


图 3 77 个区域站日平均气温与近海日平均海温的相关系数空间插值分布
 Fig.3 Spatial interpolation distribution of correlation coefficient between daily mean temperature of 77 regional stations and daily mean sea surface temperature

$$I_{UHI\text{城市偏西区}} = \frac{1}{12} \sum_{i_3=1}^{12} T_{i_3} - \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 T_j \quad (3)$$

式中, T_{i_1} ($i_1 = 1, 2, \dots, 27$) 为 27 个城区的站点气温, T_{i_2} ($i_2 = 1, 2, \dots, 15$) 为 15 个城市偏东区站点气温, T_{i_3} ($i_3 = 1, 2, \dots, 12$) 为 12 个城市偏西区站点气温, T_j ($j = 1, 2, \dots, 7$) 为 7 个参考站气温。

采用平均气温距平的空间分布来研究 UHI 的空间分布, 根据之前的研究结果 (Clarke, 1969; Bohnenstengel et al, 2011; 张璐等, 2011) 将城区或其下风方出现明显的气温正距平的现象定义为 UHI。为避免降水的影响, 在风向 (3.1 节) 和风速 (3.2.2 节) 控制性试验中剔除降水日。

在上海 I_{UHI} 与风速的年际变化关系的研究 (3.5 节) 中, 根据 Cui et al (2007) 和 Zhang et al (2010) 的方法选取徐家汇站作为城市站, 6 个远郊站 (南汇、奉贤、松江、金山、青浦、崇明) 作为参考站 (图 2), 则 I_{UHI} 表示为:

$$I_{UHI} = T_{\text{徐家汇}} - \frac{1}{6} \sum_{i_4=1}^6 T_{i_4} \quad (4)$$

式中, $T_{\text{徐家汇}}$ 为徐家汇站气温, T_{i_4} ($i_4 = 1, 2, \dots, 6$) 为 6 个参考站气温。

3 结果分析

3.1 风向对城市热岛的影响

为研究上海 UHI 与季风的关系, 首先需要研究

风向和风速对 UHI 的影响。风向主要对 UHI 分布形态产生影响(姜润,2012;成丹,2013),为研究不同风向对 UHI 空间分布的影响,将风向取自四个方向($0\sim 90^\circ$ 、 $90\sim 180^\circ$ 、 $180\sim 270^\circ$ 、 $270\sim 360^\circ$),选取外环以外出现频率最多的风向作为主导风向。用逐时风向求取逐日夜间(19 时至次日 07 时)、白天(09—17 时)(徐伟等,2018)的主导风向。再挑选出某一主导风向下所有夜间(白天)各站逐时风向和风速,运用风的矢量平均方法(沈彦燕等,2008)合成夜间(白天)各站风向,运用算数平均值求取相应各站风速,最后得到某一主导风向下夜间(白天)合成风的空间分布。

图 4 为夜间四种风向下平均气温距平和合成风

的空间分布。夜间四种风向下城区附近均表现出明显的 UHI 特征。图 4a 和 4c 中 UHI 中心出现在中环区,而图 4b 和 4d 中 UHI 中心出现在中环区下风方向。四种风向下城市周边平均风速分别为 1.6 、 2.5 、 1.9 和 $2.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,可见 UHI 中心漂移出现在风速偏大的情况下。

图 5 为白天四种风向下平均气温距平和合成风的空间分布。相对夜间,白天四种风向下多表现为下风方向大范围增暖,城区 UHI 特征不明显。图 5a 和 5b 中城市下风方出现 UHI 特征,但其上风方沿海地区均存在向岸风的抑制升温作用(表现为较明显的气温负距平,且温度沿着向岸风下风方向依次递增),这种作用同样可以导致下风方气温偏高

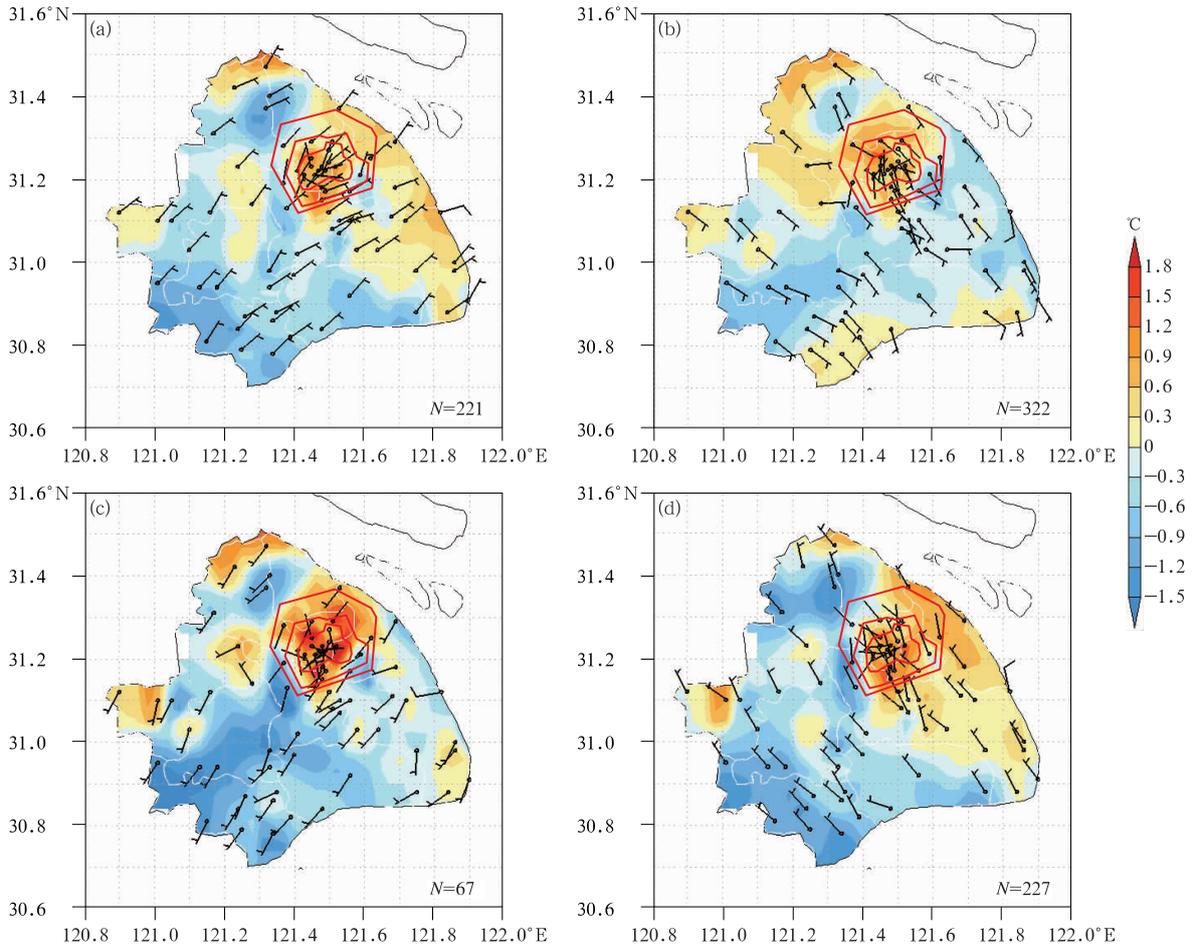


图 4 2011—2014 年上海夜间四种风向下平均气温距平和合成风的空间分布

(a) $0\sim 90^\circ$, (b) $90\sim 180^\circ$, (c) $180\sim 270^\circ$, (d) $270\sim 360^\circ$

(N 为样本次数,下同)

Fig. 4 Spatial distributions of averaged temperature departure and synthetic wind in four wind directions over night in Shanghai during 2011–2014

(a) $0\sim 90^\circ$, (b) $90\sim 180^\circ$, (c) $180\sim 270^\circ$, (d) $270\sim 360^\circ$

(N is the sample number, the same below)

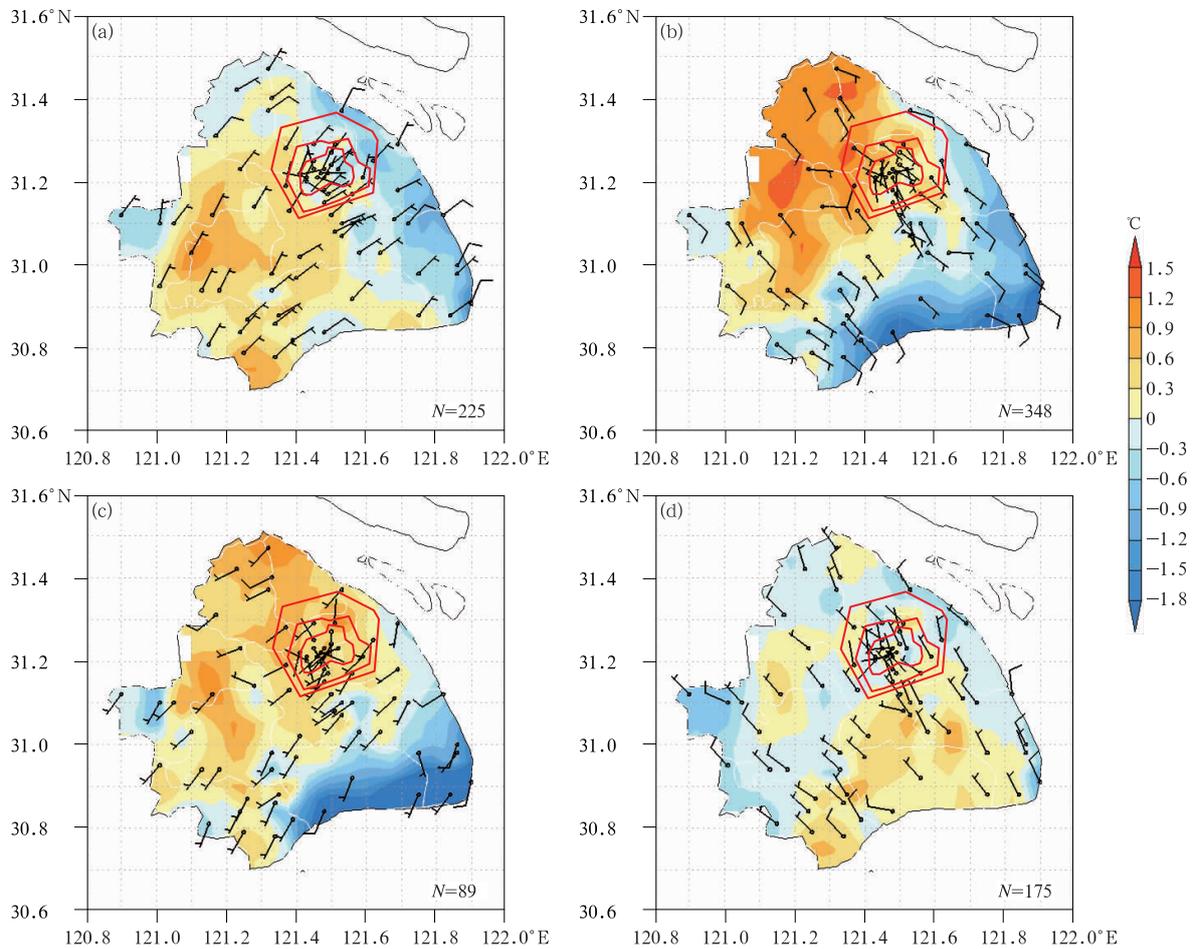


图 5 同图 4, 但为白天

Fig. 5 Same as Fig. 4, but in daytime

(Gedzelman et al, 2003), 所以图 5a 和 5b 中城市下风方大范围增暖与向岸风的作用也有关。图 5c 中内陆没有出现明显的温度梯度, 而外陆下风方向出现明显的温度梯度, 这是由于其上风方向下垫面分别为陆地和海洋所致, 再次佐证了白天向岸风存在抑制升温作用, 这有利于白天陆地气温不均一性加强。而图 5d 中城区下风方存在弱的气温正距平, 这可能与 UHI 中心漂移导致的增暖有关, 需进一步研究。另外, 白天向岸风可以影响城区气温使得 UHI 特征不明显(图 5a、5b、5c)。尽管图 5a 中向岸风的抑制升温作用相对图 5b 和 5c 中要小, 但是由于城区靠近北部沿海, 故城区受到东北向岸风的抑制升温作用更明显。由此可见, 向岸风对城区气温的影响程度也与城区相对向岸风下风方向的位置有关。

从边界层角度来看, 随着夜间地面长波辐射冷却加强, 近地层不稳定性减弱, 白天由于不稳定层产

生的湍流混合在夜间受到稳定度对垂直运动的抑制后大大衰减(Rizza et al, 2013), 夜间边界层高度也减小, 形成稳定边界层。绝对稳定的夜间边界层内湍流活动较弱, 有利于局地辐射降温, 而中性或者弱不稳定的夜间边界层不利于降温。乡村由于稳定边界层形成而迅速降温, 城市由于白天蓄热(由于城市下垫面反射率低、导热率大、热容量大引起)得到释放, 下垫面粗糙度大, 利于产生动力湍流, 还有人为热量的释放等原因导致城市上层边界层不稳定或呈中性从而减缓降温速度(Bohnenstengel et al, 2011; Hu et al, 2016), 进而增大两者夜间气温变化差异, 导致气温水平分布非均一性加强, 形成明显的 UHI。Clarke(1969)研究发现在城市下风方稳定边界层上存在相对不稳定气层(即“尾羽层”), 导致城市下风方不利于出现明显逆温, 亦不利于城市下风方的降温。Bohnenstengel et al(2011)对伦敦 UHI 进行数值模拟发现水平运动的改变可以导致 UHI

分布呈不均匀性,即城市下风方由于“尾羽层”而变暖,气温大值出现在城市中心下风方,本文的观测结果也发现这一现象,不同的是这可能与风速也有关。而白天由于太阳短波辐射加热,混合层发展较高,垂直湍流旺盛使得上下层气温得到充分交换,导致气温水平均一性加强,UHI 明显减弱,这与内陆城市北京的观测结果一致(Yang et al, 2013),但本文的观测结果显示白天气温水平非均一性反而加强。对于沿海城市而言,海陆热力差异对白天气温水平分布的影响很关键,这将在下文进一步分析。

3.2 风速对城市热岛的影响

3.2.1 城市风速与周边风速的关系

徐伟等(2018)发现受到城区内部下垫面差异的影响, I_{UHI} 呈现从内环区往外环依次递减的特征。进一步研究城市内部风速特征,有利于理解下垫面对 UHI 的作用。

图 6 为城市三个分区与城市周边的年平均风速日变化。城市周边的平均风速指外环以外 50 个区域站风速的平均。三个分区与城市周边风速的日变化均表现为白天增大、夜间减小的特点。年平均风速由城市周边到内环区依次递减,体现了城市下垫面粗糙度对风的摩擦削弱效应,即粗糙度越大,对风

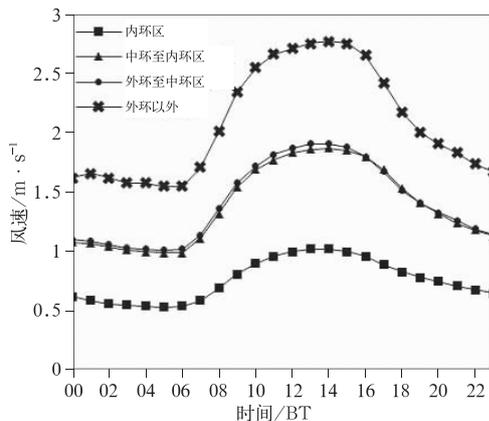


图 6 2011—2014 年上海城市三个分区
(内环区、中环至内环区、外环至中环区)

与城区周边(外环以外)的年平均风速日变化

Fig. 6 Diurnal variation of annual mean wind speed in three urban districts (in inner ring, between central ring and inner ring, between outer ring and central ring) and the surrounding areas of the urban region (the area outside outer ring) in Shanghai during 2011—2014

速的削弱越大。从风速对比可以看到白天随着周边风速增大,城市下垫面对风速的削弱作用也增大,这符合障碍物对风的影响特征(田东霞等,2014)。但研究也指出城市化的热力效应存在增大风速的作用,当风速越小,摩擦效应越弱,此时热力效应相对作用越大。Johnson and Borastein(1974)、桑建国和刘万军(1990)根据观测资料认为,存在一个风速临界值,风速高于这个值,以摩擦效应为主;低于这个值,则热力效应占优势。周淑贞和余碧霞(1988)指出上海地区的风速临界值为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从图 6 可以看到白天城市下垫面对风的摩擦效应突出,但夜间周边风速小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,热力效应使风速增大的效应并未突出,对逐日夜间风速样本统计显示城市平均风速小于乡村平均风速情况占 94.6%。这可能与城市站数量以及城市站位置有关,因为之前的研究多取单个城市站进行研究。图 6 主要体现城市下垫面摩擦削弱效应为主要机制,这与吴息和吴文倩(2016)的研究较一致。

城市下垫面粗糙度大,主要对风产生阻滞作用,使得风速减小,同时城市冠层通过垂直风切变促进平均动量向湍流动量的转换,利于垂直湍流感热交换和动量交换(Martilli, 2002)。白天,随风速增大,城市虽然有较高的热量和较大的湍流感热交换(陈燕和蒋维楣,2007),但混合层的存在增大了气温垂直交换,也使得水平运动增大,有利于气温空间一致性加强(Acevedo and Fitzjarrald, 2001),使得 UHI 减弱。夜间,随风速减小,水平运动作用减小,受下垫面影响气温局地特征凸显。城市热量足以导致边界层呈中性(甚至出现浅的混合层),同时城市冠层风切变产生更多湍流加强垂直感热交换,进而延缓气温的下降速率。相反,乡村地区下垫面单一,地表粗糙度小不利于产生动力湍流,利于夜间形成静稳边界层,甚至出现逆温层,长波辐射冷却强烈,导致近地面气温迅速下降。故而夜间城乡之间气温差异增大,形成明显 UHI 现象。

3.2.2 城市热岛与风速的关系

由前面的研究发现夜间 UHI 中心漂移可能与风速有关,白天风速较大但实际也增大了向岸风的作用,反而使得气温不均一性加强以致难以捕捉 UHI 形态,所以进一步研究夜间同一主导风向不同风速条件时 UHI 的空间分布特征。考虑到春夏季夜间向岸风抑制降温作用不明显(见 3.3 节)且城区位于上海北部,故以春夏季偏北风作为夜间主导

风向进行研究。

图 7 为春夏季夜间偏北风为主导风向下,城市周边不同风速时平均气温距平的空间分布。夜间城市下风方向的增暖范围与风速有关:当城市周边平均风速在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下时 UHI 中心维持在城区,当大于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时 UHI 中心开始向城市下风方向漂移,随着风速增大,增暖区向城市下风方向延伸,同时随着风速增大 I_{UHI} 减小。为证明夜间 UHI 中心发生明显漂移的风速阈值为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 具有普遍性,给出夜间城市周边不同风速时平均气温距平和合成风的空间分布(图 8),可以看到当平均风速达到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上时出现明显的 UHI 中心漂移现象。需要指出的是,图 8c 和 8d 中城市下风方有小

片弱气温负距平可能与对应两个站的周边环境有关(陈辉等,2008),但随着风速增大,UHI 中心向城区下风方移动,该气温负距平区缩小减弱,也可以说明其受 UHI 影响程度在增大。

前面研究了 UHI 形态与风速的关系,进一步研究 I_{UHI} 与风速的关系。由式(1)计算城区夜间平均 I_{UHI} ,其与城市周边平均风速有很好的对应关系(图 9),两者呈明显负相关,相关系数达 -0.56 ,即 I_{UHI} 随周边风速的减小而增大。并且城市周边平均风速达到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上时 I_{UHI} 减小趋势变得不明显,也佐证了 UHI 中心平均漂移的风速阈值为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

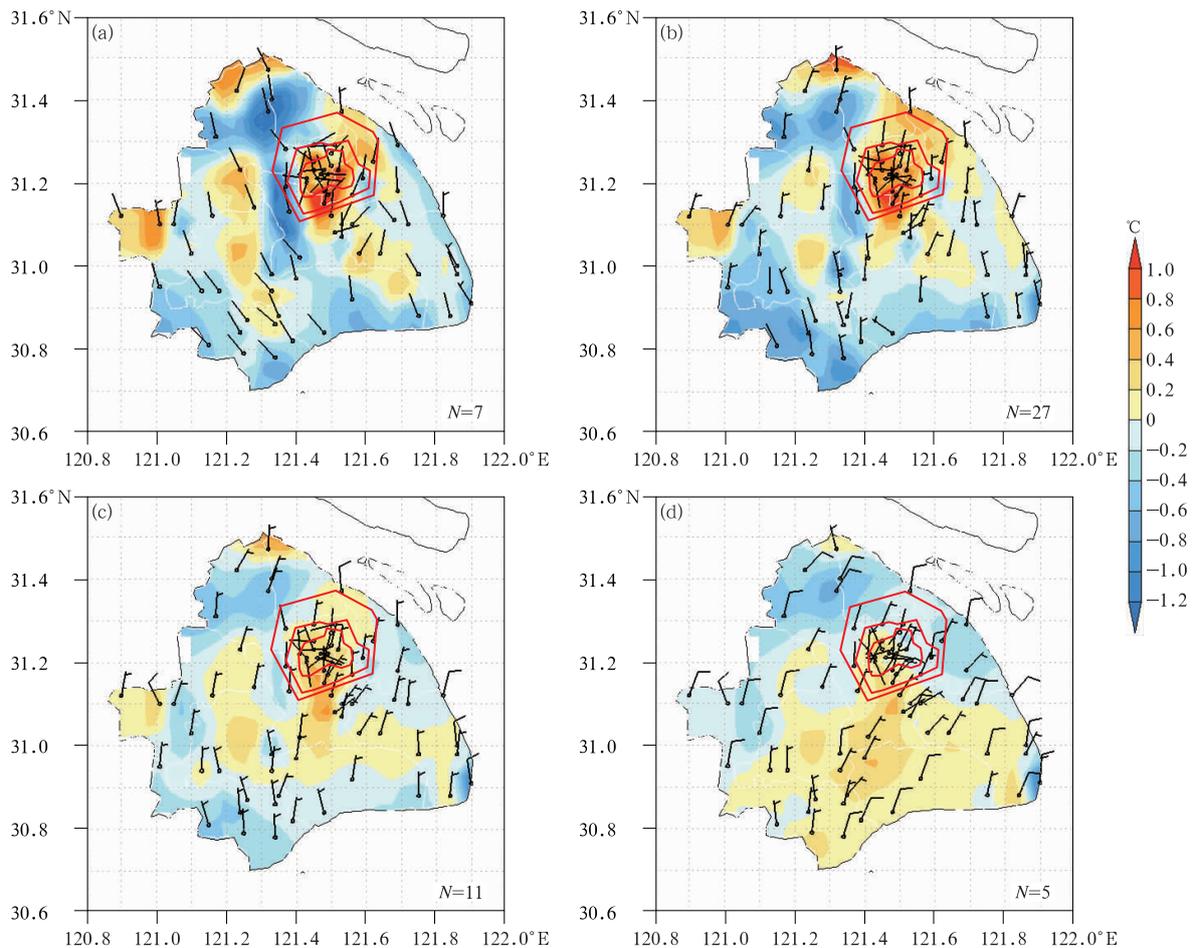


图 7 2011—2014 年上海春夏季夜间偏北风向下城市周边不同风速时平均气温距平和合成风的空间分布

(a) $<1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, (b) $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, (c) $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, (d) $3 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 7 Spatial distributions of averaged temperature departure and synthetic wind at different northerly wind speeds in Shanghai over night in spring and summer of 2011—2014

(a) $<1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, (b) $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, (c) $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, (d) $3 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

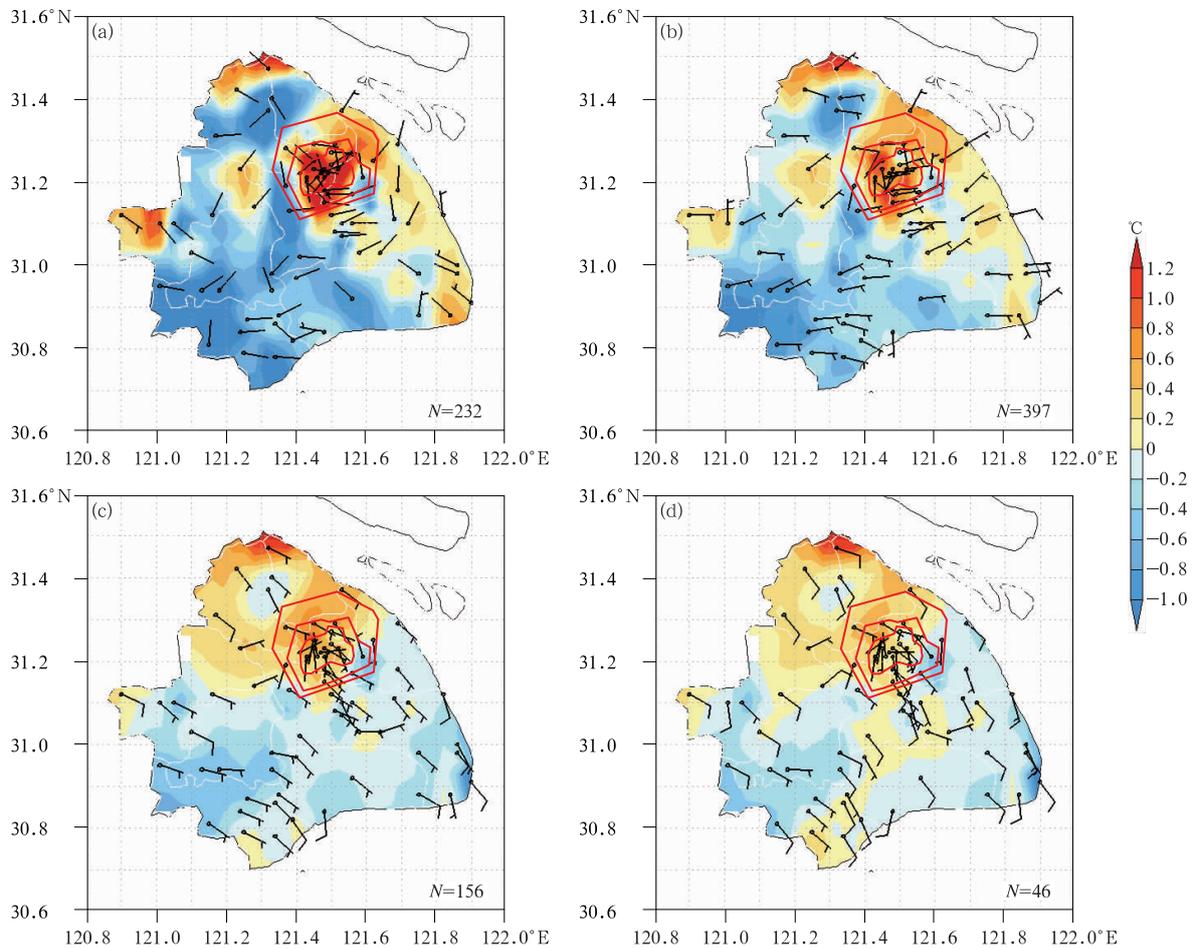


图 8 2011—2014 年上海夜间城市周边不同风速时平均气温距平和合成风的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of averaged temperature departure and synthetic wind at different wind speeds over night of 2011—2014 in Shanghai

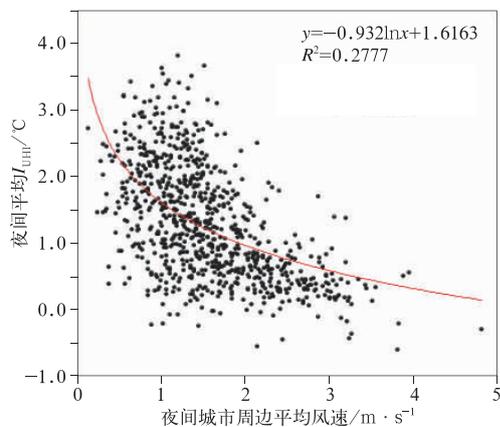


图 9 夜间平均 I_{UHI} 与城市周边平均风速大小的关系

Fig. 9 Correlation between average I_{UHI} and average wind speed around the city at night

3.3 城市热岛与季风的关系

徐伟等(2018)研究发现上海 UHI 季节性空间分布与季风可能存在联系,进一步通过各季节(春季 3—5 月、夏季 6—8 月、秋季 9—11 月、冬季 12—2 月)的气温距平和主导风向的空间分布来揭示 UHI 与季风的关系。

用 3.1 节中的方法选取各季节夜间(白天)各站逐时风向和风速求合成风。图 10 为各季节夜间平均气温距平和合成风向的空间分布。由图可见,各季夜间城区附近 UHI 特征明显,尤以秋冬季最为明显,春季次之,夏季最不明显。秋冬季夜间 UHI 中心稳定在城区,UHI 形态与图 8a 和 8b 类似,表现为典型 UHI;春夏季 UHI 中心出现在城区西北侧。由于春夏季盛行东南风且夜间平均风速为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略),所以春夏季夜间 UHI 中心易于向城市

西北下风方向漂移(图 10a、10b),而秋冬季夜间平均风速小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略),所以秋冬季夜间 UHI 中心易于稳定在城区(图 10c、10d)。

各季夜间主导风向均由水域指向陆地,可知季风类似一支向岸风。秋冬季东北沿海地区出现明显气温正距平,并且温度沿下风方向往内陆递减,证明秋冬季季风夜间与沿岸形成的向岸风存在明显的抑制降温作用。这种特征以秋季最为明显,冬季次之,春夏季无体现。城区靠近东北沿岸,且秋冬季夜间向岸风抑制降温作用明显,故 I_{UHI} 易受向岸风影响而增大(图 10c、10d)。

图 11 为各季节白天平均气温距平和合成风的空间分布。各季白天主导风向均由水域指向陆地(再次证明季风类似一支向岸风),气温沿着向岸风下风方向递增,说明白天向岸风均存在抑制升温作

用。春夏季下风方内陆地区出现大范围显著增暖且向岸风作用显著,可见向岸风作用导致春夏季白天陆地气温非均一性显著增大;而秋冬季向岸风的作用明显减小,所以城区下风方增暖主要由 UHI 中心漂移引起。由于白天地面太阳短波辐射的升温效果远比夜间地面长波辐射的降温效果来得强烈,加大白天尤其是午后海陆温差,因而相对夜间,白天向岸风抑制升温作用在四季均有体现,尤以春夏季较明显。由于向岸风的作用四季存在,且白天风速往往大于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略),为 UHI 中心漂移提供有利条件,所以白天下风方的大范围增暖现象是向岸风作用和 UHI 作用两者的综合效应。值得注意的是夏季气温并不是完全沿着向岸风方向递增,增暖区出现在下风方向的左侧,说明还存在其他影响气温均一性分布的因子,可能与夏季城区多对流降水降

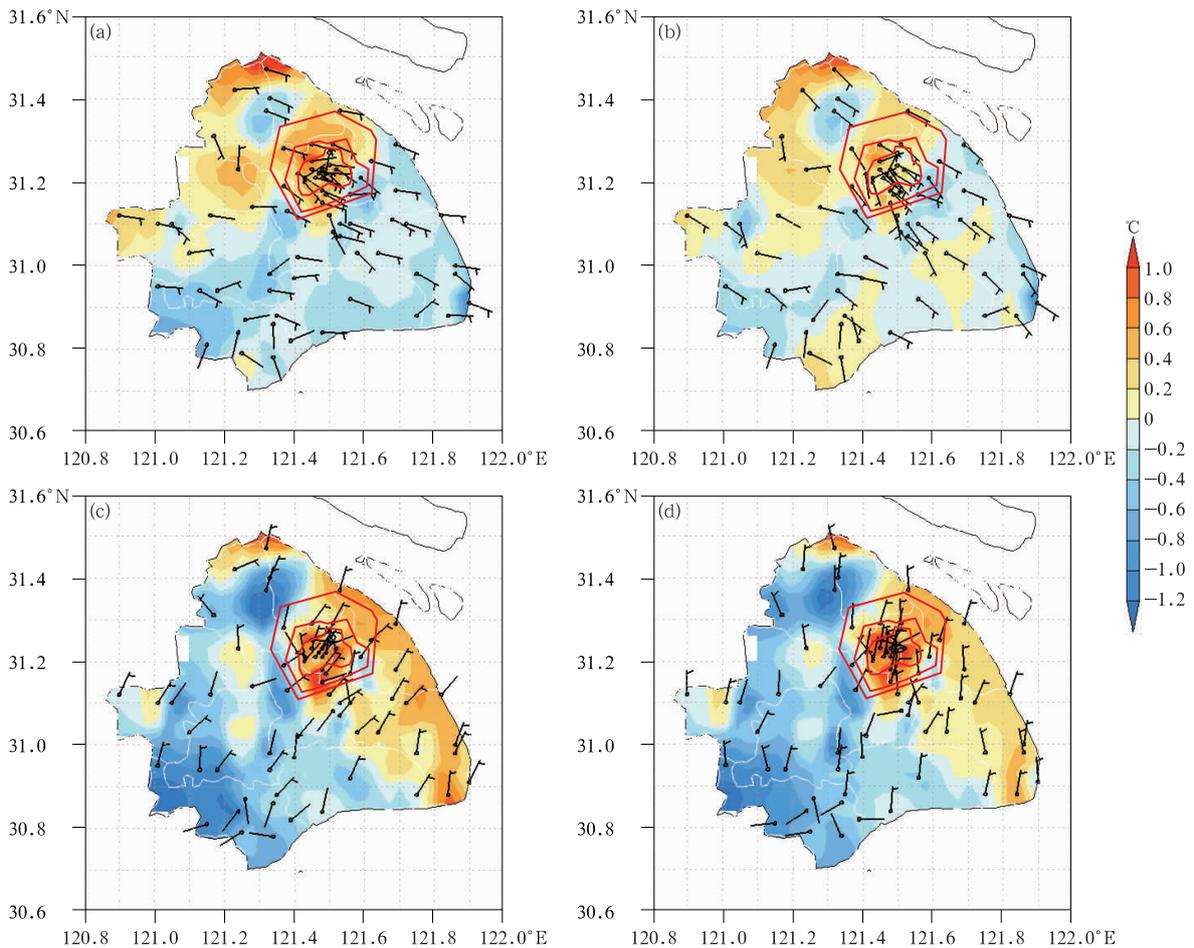


图 10 2011—2014 年上海夜间平均气温距平和合成风的空间分布
(a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季

Fig. 10 Spatial distributions of averaged temperature departure and synthetic wind in Shanghai at night in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter of 2011–2014

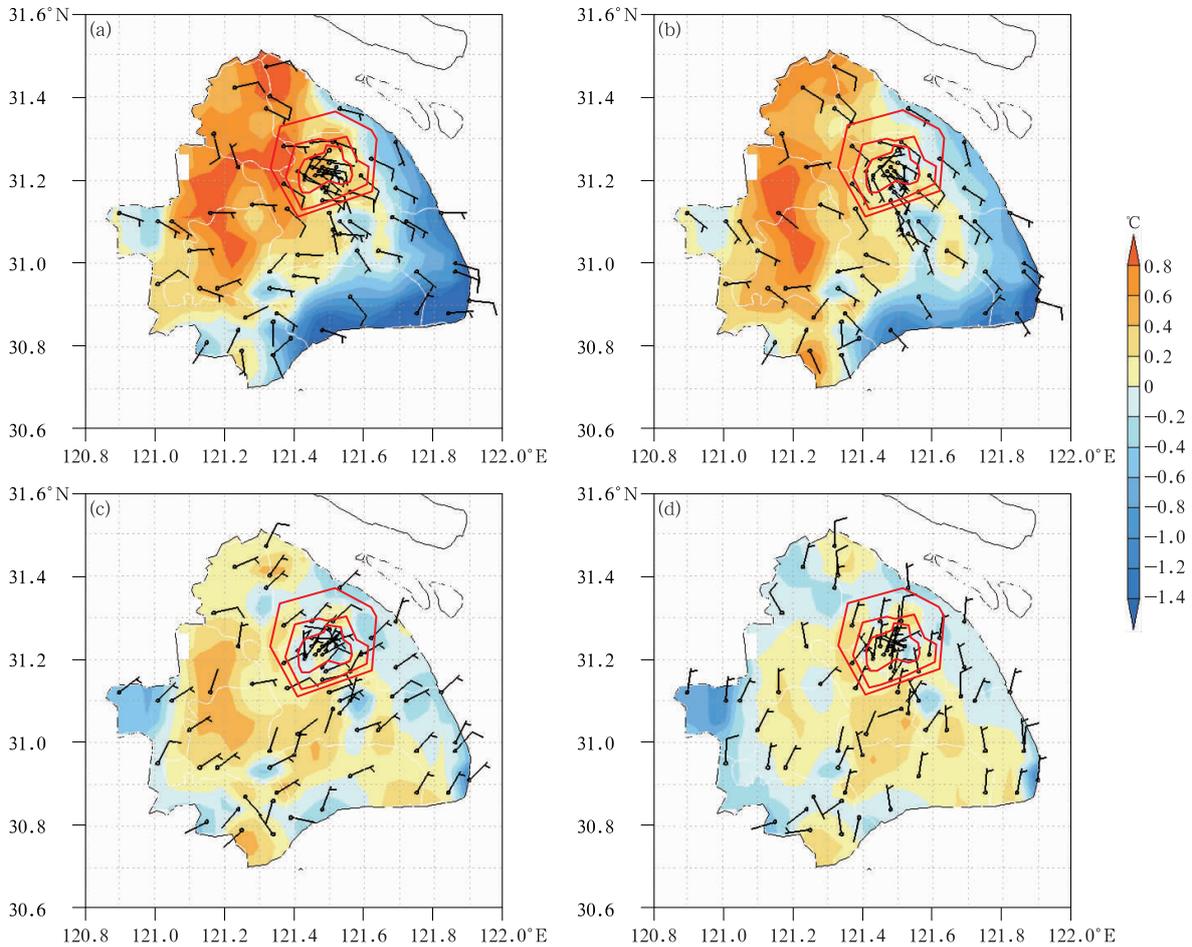


图 11 同图 10, 但为白天

Fig. 11 Same as Fig. 10, but in daytime

温、海风锋登陆降温等有关(梁萍等, 2011; 顾问等, 2017)。

3.4 海陆热力差对热岛强度的影响

前面的研究发现上海季风类似一支向岸风, 向岸风可以对 I_{UHI} 产生影响。向岸风作用的大小主要取决于盛行风风速和海陆热力差大小, 海陆热力差通过向岸风对 I_{UHI} 产生影响。根据海陆热力差具有明显的季节变化和日变化特征, 以及 2.1 节的分析将城区划分为偏东区和偏西区, 根据其各季节的 I_{UHI} 日变化来反映海陆热力差对 I_{UHI} 的影响(图 12)。

由图 12 可见, 城市偏东区和偏西区的 I_{UHI} 平均日变化存在明显季节性差异。春夏季夜间两区域 I_{UHI} 接近, 白天差异明显, 白天偏西区 I_{UHI} 明显大于偏东区(春夏季两区 I_{UHI} 最大相差分别为 0.34 和

0.18℃), 这是由于春夏季白天海陆热力差异较大, 向岸风的抑制升温作用明显, 同时春夏季盛行东南向岸风, 故偏东区受到向岸风抑制升温作用较大(图 11a、11b)。春夏季夜间海陆热力差异较小, 故而城市两区 I_{UHI} 接近。另外, 春季白天两区 I_{UHI} 差异明显大于夏季。一方面是因为春夏季白天平均风速接近(图略), 受海陆热力差异影响春季向岸风的抑制升温作用更大(白天春季沿海地区气温梯度比夏季大); 另一方面是因为夏季城市对流性降水较多和海风锋易生成并登陆城区等原因也使得城市内部气温均一性加强。

秋冬季夜间城市偏东区 I_{UHI} 要大于偏西区(秋冬季两区 I_{UHI} 最大相差分别为 0.51 和 0.46℃), 这是由于秋冬季夜间海陆热力差异明显, 向岸风的抑制降温作用显著, 偏东区受到东北向岸风抑制升温作用较大(图 10c、10d)。秋季夜间两区 I_{UHI} 差异

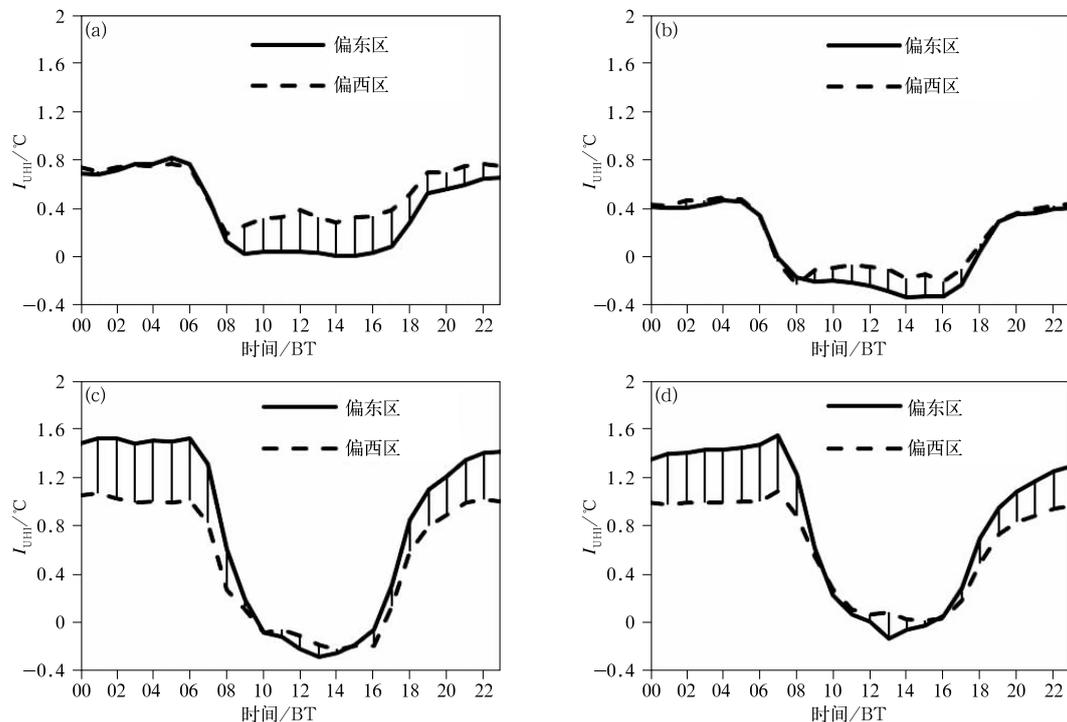


图 12 2011—2014 年上海城市偏东区和偏西区的 I_{UHI} 平均日变化

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

Fig. 12 Average diurnal variation of I_{UHI} in the eastern and western parts of the urban area in Shanghai in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter of 2011—2014

略大于冬季。这是由于秋冬季夜间平均风速接近(图略),受海陆热力差异影响秋季向岸风的抑制降温作用更大(秋季夜间沿海气温梯度比冬季大)所导致。

一般白天海表温度较陆地低,通常海面上大气湍流较弱,边界层稳定度大,吹向岸风时,近岸边界层稳定度增强,导致混合层变低(张振州等,2013),湍流减弱,不利于沿岸地区升温。春夏季盛行东南季风并且白天海陆热力差异明显,故而导致春夏季沿海出现明显的气温负距平。而夜间一般海表温度较陆地高,通常海面上大气湍流较强,边界层稳定度小,吹向岸风时,近岸边界层稳定度减弱或变不稳定(Franchito et al, 2007),湍流加强,不利于沿岸地区降温,其作用类似城市下风方向增暖。秋冬季夜间海陆热力差异明显并且受到向岸风的影响,导致秋冬季沿海出现明显的气温正距平。

3.5 各季热岛强度与地面风速的年际变化关系

前面从气候平均态上研究了季风对上海 UHI 的影响,下面从年际变化上来研究上海各季 I_{UHI} 与

地面风速的关系。由于远郊站受城市化影响较小(Zhang et al, 2010),故采用 6 个远郊站(图 2)的平均风速代表上海地区背景风速。图 13 为各季节 I_{UHI} 和风速的年际变化。由图可见,1961—2014 年上海各季风速均表现为递减趋势,春夏秋冬四季平均风速递减率分别为 -0.31 、 -0.25 、 -0.24 和 $-0.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,其中春冬季风速减小最明显,这与 Guo et al(2011)和 Lin et al(2013)的结论吻合。相应的各季 I_{UHI} 整体均表现为缓慢上升的趋势,各季 I_{UHI} 递增率差异较小,分别为 0.21 、 0.18 、 0.17 和 $0.19 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。年平均 I_{UHI} 与风速呈显著负相关,各季两者相关系数分别为 -0.88 、 -0.64 、 -0.68 和 -0.87 ,均通过 0.01 显著性水平检验,可见各季地面风速的减小为 I_{UHI} 的增大提供了有利条件。值得注意的是 21 世纪以来各季 I_{UHI} 均呈现减缓特征(夏秋季减缓特征相对显著),而 21 世纪以来各季风速仍呈现一致的减小趋势(冬季减小最明显)。21 世纪以来上海进入历史低风速区或为 I_{UHI} 减缓提供一定有利条件,但 21 世纪以来各季风速的年际变化不足以解释各季 I_{UHI} 减缓差异,

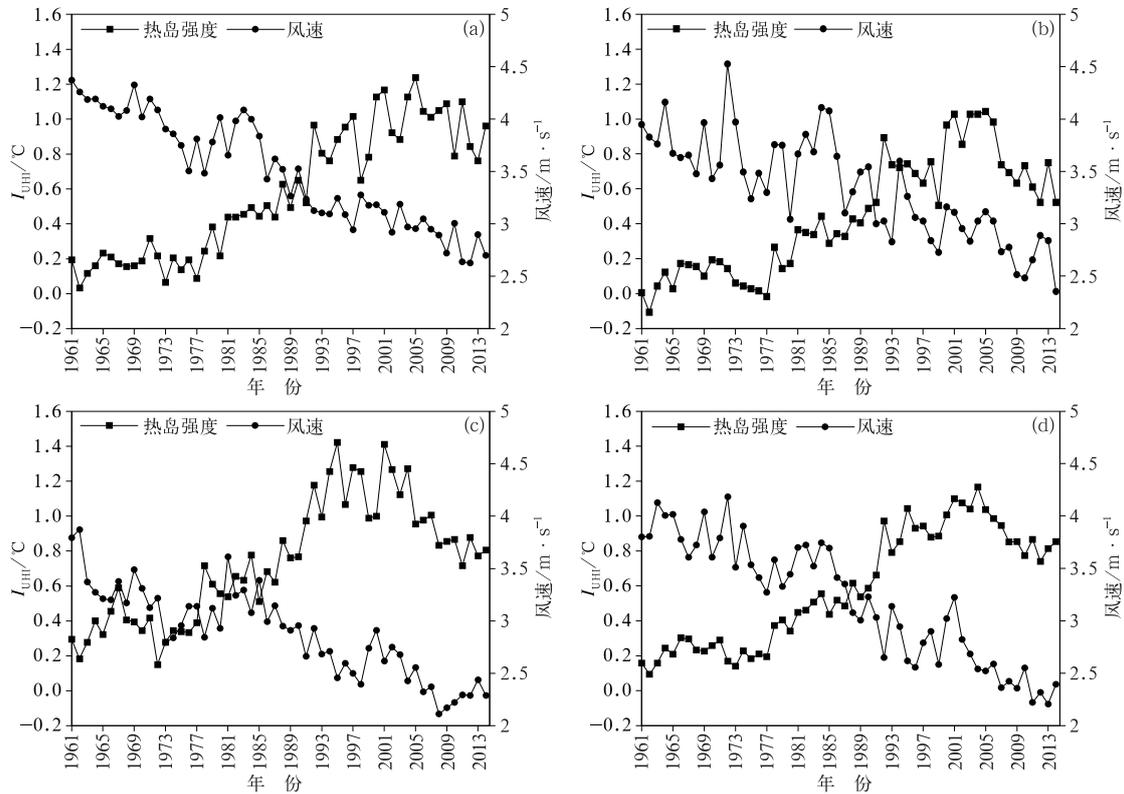


图 13 1961—2014 年上海 I_{UHI} 和地面风速的年际变化

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

Fig. 13 Interannual variations of I_{UHI} and surface wind speed in Shanghai in (a) spring,

(b) summer, (c) autumn, (d) winter of 1961—2014

并且之前的研究得出风速减小有利于 I_{UHI} 增大, 说明风速并不是导致 I_{UHI} 减缓的主要因素, 这可能与 UHI 的其他影响因子有关, 需进一步研究。

4 结论和讨论

本文首先基于上海区域站气温和风资料, 研究了地面风对上海 UHI 的影响及 UHI 季节性空间分布特征的成因。其次, 基于上海国家站长时间序列气温和风资料, 研究了上海各季 I_{UHI} 与地面风速的年际变化关系。得到如下主要结论:

(1) UHI 中心的位置与风向、风速有密切的关系, 特别是夜间 UHI 中心有向城市下风方向漂移的特征, 其平均漂移风速阈值为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 并且 UHI 区域随风速增大向城市下风方延伸, I_{UHI} 随风速的增大而减小。

(2) 季节地面盛行风决定了上海 UHI 的季节性空间分布特征: 各季夜间 UHI 特征明显, 尤以秋冬季最为明显, 春季次之, 夏季最不明显。春夏季夜

间 UHI 中心出现在城区西北侧, 而秋冬季夜间 UHI 中心稳定在城区, 表现为典型 UHI; 各季白天均表现为下风方大范围增暖现象, 春夏季主要由盛行风的抑制升温作用导致, 而秋冬季主要由 UHI 中心漂移导致。

(3) 白天向岸风具有抑制升温作用(春夏季最为明显), 受其影响气温大值区易出现在内陆地区, 春夏季城市偏东区 I_{UHI} 小于偏西区; 夜间向岸风具有抑制降温作用(秋冬季最为明显), 受其影响秋冬季东部沿海地区出现明显增暖且城市偏东区 I_{UHI} 大于偏西区。海陆热力差随季节不同和盛行风风速大小决定了向岸风这种作用的大小及影响范围。

(4) 1961—2014 年上海各季风速均表现为递减趋势(秋冬季风速减小最明显), 相应各季 I_{UHI} 整体均表现为缓慢上升趋势。两者呈显著负相关, 各季地面风速的减小为 I_{UHI} 的增大提供了有利条件。21 世纪以来各季 I_{UHI} 均呈现减缓特征(夏秋季减缓最明显), 风速并不是导致 I_{UHI} 减缓的主要因素。

许多研究(丁金才等, 2002; 霍飞和陈海山,

2011;姜润,2012;成丹,2013)已经揭示 UHI 中心漂移的现象,这与城市下风方存在“尾羽层”(Clarke, 1969; Bohnenstengel et al, 2011)有密切联系,但之前的研究多从风向的角度去研究 UHI 中心漂移,本文研究指出 UHI 中心漂移存在风速阈值,并且风速与 I_{UHI} 存在明显的负相关,所以“尾羽层”与风速的联系值得被进一步研究。本文初步揭示了对于沿海型城市而言海陆热力差可以通过向岸风作用进一步增大气温水平非均一性(尤其体现在白天)以及对 UHI 产生影响。在本文中白天存在下风方大范围增暖现象(图 5、图 11),尽管不排除图 5 中存在大尺度环流引起的大范围暖异常的可能,但四季平均状态下依然存在这种现象(图 11)足以说明这种大范围增暖并非大尺度环流引起,而是 UHI 中心漂移和向岸风作用的共同结果。故按照城乡对比法计算得的 I_{UHI} 已经无法反映真实的 I_{UHI} ,其随参考站位置的不同会产生较大变化,有待进一步用数值模式研究白天 UHI 中心漂移和向岸风作用对下风方增暖的贡献差异。另外,本文发现 21 世纪以来上海 I_{UHI} 四季均表现减缓特征,与徐伟等(2018)结论一致,并指出风速并非导致 I_{UHI} 减缓的主要因素。

致谢:感谢南京大学大气科学学院杨修群教授、王元教授与中国气象局气象干部培训学院俞小鼎教授给予的支持和帮助。

参考文献

- 陈辉,张国璋,谈建国,2008. 上海城市区域不同下垫面的温度特征分析[C]//第五届长三角科技论坛——长三角气象科技创新论坛论文集. 上海:中国气象学会:585-588. Chen H, Zhang G L, Tan J G, 2008. Analysis on temperature characteristics with different underlying surfaces in Shanghai urban area[C]//Proceedings of Yangtze River Delta Meteorological Technology Forum. Shanghai: Chinese Meteorological Society: 585-588(in Chinese).
- 陈燕,蒋维楣,2007. 南京城市化进程对大气边界层的影响研究[J]. 地球物理学报, 50(1): 66-73. Chen Y, Jiang W M, 2007. Impact of Nanjing urban development on the boundary layer[J]. Chin J Geophys, 50(1): 66-73(in Chinese).
- 陈志,俞炳丰,胡汪洋,等,2004. 城市热岛效应的灰色评价与预测[J]. 西安交通大学学报, 38(9): 985-988. Chen Z, Yu B F, Hu W Y, et al, 2004. Grey assessment and prediction of the urban heat island effect in city[J]. J Xi'an Jiaotong Univ, 38(9): 985-988(in Chinese).
- 成丹,2013. 中国东部地区城市化对极端温度及区域气候变化的影响[D]. 南京:南京大学. Cheng D, 2013. Impact of urbanization of the eastern China on extreme temperature and regional climate change[D]. Nanjing: Nanjing University(in Chinese).
- 邓莲堂,束炯,李朝颐,2001. 上海城市热岛的变化特征分析[J]. 热带气象学报, 17(3): 273-280. Deng L T, Shu J, Li C Y, 2001. Character analysis of Shanghai urban heat island[J]. J Trop Meteor, 17(3): 273-280(in Chinese).
- 丁金才,张志凯,奚红,等,2002. 上海地区盛夏高温分布和热岛效应的初步研究[J]. 大气科学, 26(3): 412-420. Ding J C, Zhang Z K, Xi H, et al, 2002. A study of the high temperature distribution and the heat island effect in the summer of the Shanghai Area[J]. Chin J Atmos Sci, 26(3): 412-420(in Chinese).
- 丁硕毅,乔冠瑾,郭媛媛,等,2015. 珠三角城市群热岛及其气象影响因子研究[J]. 热带气象学报, 31(5): 681-690. Ding S Y, Qiao G J, Guo Y Y, et al, 2015. Study on the urban heat islands and meteorological elements over the Pearl River Delta[J]. J Trop Meteor, 31(5): 681-690(in Chinese).
- 顾问,张晶,谈建国,等,2017. 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[J]. 热带气象学报, 33(5): 644-653. Gu W, Zhang J, Tan J G, et al, 2017. Characteristics and circulation background of Shanghai summer sea breeze front and its induced convection[J]. J Trop Meteor, 33(5): 644-653(in Chinese).
- 霍飞,陈海山,2011. 大尺度环境风场对城市热岛效应影响的数值模拟试验[J]. 气候与环境研究, 16(6): 679-689. Huo F, Chen H S, 2011. Numerical simulation of the effect of large-scale wind on urban heat island[J]. Climatic Environ Res, 16(6): 679-689(in Chinese).
- 姜润,2012. 南京夏季城市热岛时空分布特征观测及模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Jiang R, 2012. Observation and simulation analysis on distribution characteristics of Nanjing summer urban heat island[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 江学顶,夏北成,郭砾,等,2007. 广州城市热岛空间分布及时域-频域多尺度变化特征[J]. 应用生态学报, 18(1): 133-139. Jiang X D, Xia B C, Guo L, et al, 2007. Characteristics of multi-scale temporal-spatial distribution of urban heat island in Guangzhou[J]. Chin J Appl Ecol, 18(1): 133-139(in Chinese).
- 李兴荣,胡非,舒文军,等,2008. 北京秋季城市热岛效应及其气象影响因子[J]. 气候与环境研究, 13(3): 291-299. Li X R, Hu F, Shu W J, et al, 2008. Characteristics of urban heat island effect and its meteorological influencing factors over Beijing in autumn[J]. Climatic Environ Res, 13(3): 291-299(in Chinese).
- 梁萍,丁一汇,何金海,等,2011. 上海地区城市化速度与降水空间分布变化的关系研究[J]. 热带气象学报, 27(4): 475-483. Liang P, Ding Y H, He J H, et al, 2011. Study of relationship between urbanization speed and change of spatial distribution of rainfall over Shanghai[J]. J Trop Meteor, 27(4): 475-483(in Chinese).
- 林学椿,于淑秋,2005. 北京地区气温的年代际变化和热岛效应[J]. 地球物理学报, 48(1): 39-45. Lin X C, Yu S Q, 2005. Interdecadal changes of temperature in the Beijing Region and its heat island effect[J]. Chin J Geophys, 48(1): 39-45(in Chinese).
- 戎春波,刘红年,朱焱,2009. 苏州夏季城市热岛现状及影响因子分析研究[J]. 气象科学, 29(1): 84-87. Rong C B, Liu H N, Zhu Y, 2009. The study of the urban heat island and its influence

- factors in Suzhou City[J]. *Sci Meteor Sin*, 29(1):84-87(in Chinese).
- 桑建国,刘万军,1990. 冬季城市边界层风场和温度场结构分析[J]. *气象学报*, 48(4):459-468. Sang J G, Liu W J, 1990. An analysis on flow and temperature structure of wintertime urban boundary layer[J]. *Acta Meteor Sin*, 48(4):459-468(in Chinese).
- 沈彦燕,袁峰,张静,等,2008. 矢量平均法测量地面风[J]. *气象水文海洋仪器*, (2):80-83. Shen Y Y, Yuan F, Zhang J, et al, 2008. Measure the surface wind by vector average method[J]. *Meteor Hydrol Marine Instrum*, (2):80-83(in Chinese).
- 沈钟平,梁萍,何金海,2017. 上海城市热岛的精细结构气候特征分析[J]. *大气科学学报*, 40(3):369-378. Shen Z P, Liang P, He J H, 2017. Analysis on the climatic characteristics of the fine structure of the urban heat island in Shanghai[J]. *Trans Atmos Sci*, 40(3):369-378(in Chinese).
- 寿亦萱,张大林,2012. 城市热岛效应的研究进展与展望[J]. *气象学报*, 70(3):338-353. Shou Y X, Zhang D L, 2012. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects[J]. *Acta Meteor Sin*, 70(3):338-353(in Chinese).
- 孙继松,舒文军,2007. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究[J]. *大气科学*, 31(2):311-320. Sun J S, Shu W J, 2007. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing Region[J]. *Chin J Atmos Sci*, 31(2):311-320(in Chinese).
- 田东霞,郭建侠,陈挺,等,2014. 障碍物对风速风向影响的观测试验[J]. *气象科技*, 42(5):881-887. Tian D X, Guo J X, Chen T, et al, 2014. Observational experiment on effect of obstacles on wind speed and wind direction[J]. *Meteor Sci Technol*, 42(5):881-887(in Chinese).
- 王志春,徐海秋,汪宇,2017. 珠三角城市群化发展对热岛强度的影响[J]. *气象*, 43(12):1554-1561. Wang Z C, Xu H Q, Wang Y, 2017. Influence of Pearl River Delta urban cluster development on urban heat island intensity[J]. *Meteor Mon*, 43(12):1554-1561(in Chinese).
- 吴风波,汤剑平,2015. 城市化对长江三角洲地区夏季降水、气温的影响[J]. *热带气象学报*, 31(2):255-263. Wu F B, Tang J P, 2015. The impact of urbanization on summer precipitation and temperature in the Yangtze River Delta[J]. *J Trop Meteor*, 31(2):255-263(in Chinese).
- 吴息,吴文倩,2016. 南京地面风速概率分布律的城乡差异[J]. *气候与环境研究*, 21(2):134-140. Wu X, Wu W Q, 2016. Urban-rural differences in the probability distribution of surface wind speed in Nanjing[J]. *Climatic Environ Res*, 21(2):134-140(in Chinese).
- 徐伟,杨涵清,张仕鹏,等,2018. 上海城市热岛的变化特征[J]. *热带气象学报*, 34(2):228-238. Xu W, Yang H W, Zhang S P, et al, 2018. Variations of the urban heat island effect in Shanghai[J]. *J Trop Meteor*, 34(2):228-238(in Chinese).
- 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 L, Yang X Q, Tang J P, 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]. *Sci Meteor Sin*, 31(4):431-440(in Chinese).
- 张振州,蔡旭晖,宋宇,等,2013. 海南岛地区大气边界层高度的时空变化特征[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 49(5):783-790. Zhang Z Z, Cai X H, Song Y, et al, 2013. Temporal and spatial variation of atmospheric boundary layer height over Hainan Island and its adjacent sea areas[J]. *Acta Sci Nat Univ Pekinensis*, 49(5):783-790(in Chinese).
- 赵娜,刘树华,虞海燕,2011. 近 48 年城市化发展对北京区域气候的影响分析[J]. *大气科学*, 35(2):373-385. Zhao N, Liu S H, Yu H Y, 2011. Urbanization effects on local climate in Beijing in recent 48 years[J]. *Chin J Atmos Sci*, 35(2):373-385(in Chinese).
- 周淑贞,余碧霞,1988. 上海城市对风速的影响[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, (3):67-76. Zhou S Z, Yu B X, 1988. Shanghai urban influences on wind velocity[J]. *J East China Normal Univ (Nat Sci)*, (3):67-76(in Chinese).
- Acevedo O C, Fitzjarrald D R, 2001. The early evening surface-layer transition: temporal and spatial variability[J]. *J Atmos Sci*, 58(17):2650-2667.
- Akbari H, Xu T F, Taha H, et al, 2011. Using cool roofs to reduce energy use, greenhouse gas emissions, and urban heat-island effects: findings from an India experiment[R]. USA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Arnfield A J, 2003. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island[J]. *Int J Climatol*, 23(1):1-26.
- Aslam M Y, Krishna K R, Beig G, et al, 2017. Seasonal variation of urban heat island and its impact on air-quality using SAFAR observations at Delhi, India[J]. *Am J Climate Change*, 6(2):294-305.
- Bohnenstengel S I, Evans S, Clark P A, et al, 2011. Simulations of the London urban heat island[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137(659):1625-1640.
- Che Ani A I, Shahmohamadi P, Sairi A, et al, 2009. Mitigating the urban heat island effect: some points without altering existing city planning[J]. *Eur J Sci Res*, 35(2):204-216.
- Clarke J F, 1969. Nocturnal urban boundary layer over Cincinnati, Ohio[J]. *Mon Wea Rev*, 97(8):582-589.
- Cui L L, Shi J, Gao Z Q, 2007. Urban heat island in Shanghai, China [C]// *Proceedings of Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability IV*. San Diego, California; SPIE, 6679:667911.
- Franchito S H, Rao V B, Oda T O, et al, 2007. An observational study of the evolution of the atmospheric boundary-layer over Cabo Frio, Brazil[J]. *Ann Geophys*, 25(8):1735-1744.
- Gallo K P, McNab A L, Karl T R, et al, 1993. The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect[J]. *J Appl Meteor*, 32(5):899-908.

- Gedzelman S D, Austin S, Cermak R, et al, 2003. Mesoscale aspects of the urban heat island around New York City[J]. *Theor Appl Climatol*, 75(1): 29-42.
- Guo H, Xu M, Hu Q, 2011. Changes in near-surface wind speed in China: 1969—2005[J]. *Int J Climatol*, 31(3): 349-358.
- Hu X M, Xue M, Klein P M, et al, 2016. Analysis of urban effects in Oklahoma city using a dense surface observing network[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 55(3): 723-741.
- Johnson D S, Borastein R D, 1974. Urban-rural wind velocity differences and their effects on computed pollution concentrations in New York City[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 55(5): 520.
- Kato S, Yamaguchi Y, 2005. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM + Data: separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux [J]. *Remote Sens Environ*, 99(1/2): 44-54.
- Kim Y H, Baik J J, 2005. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul[J]. *J Appl Meteor*, 44(5): 591-605.
- Li J H, 1998. Study of relation between land cover conditions and temperature based on Landsat/TM data[J]. *Remote Sens Technol Appl*, 13(1): 18-28.
- Lin C G, Yang K, Qin J, et al, 2013. Observed coherent trends of surface and upper-air wind speed over China since 1960[J]. *J Climate*, 26(9): 2891-2903.
- Magee N, Curtis J, Wendler G, 1999. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska[J]. *Theor Appl Climatol*, 64(1/2): 39-47.
- Martilli A, 2002. Numerical study of urban impact on boundary layer structure: sensitivity to wind speed, urban morphology, and rural soil moisture[J]. *J Appl Meteor*, 41(12): 1247-1266.
- Menberg K, Blum P, Schaffitel A, et al, 2013. Long-term evolution of anthropogenic heat fluxes into a subsurface urban heat island [J]. *Environ Sci Technol*, 47(17): 9747-9755.
- Miao S G, Chen F, Lemone M A, et al, 2009. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 48(3): 484-501.
- Morris C J G, Simmonds I, Plummer N, 2001. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city[J]. *J Appl Meteor*, 40(2): 169-182.
- Oke T R, 1982. The energetic basis of the urban heat island[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 108(455): 1-24.
- Rizza U, Miglietta M M, Degrazia G A, et al, 2013. Sunset decay of the convective turbulence with large-eddy simulation under realistic conditions[J]. *Phys A Statist Mechan Appl*, 392(19): 4481-4490.
- Ryu Y H, Baik J J, 2012. Quantitative analysis of factors contributing to urban heat island intensity[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 51(5): 842-854.
- Tan J G, Zheng Y F, Tang X, et al, 2010. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai[J]. *Int J Biometeor*, 54(1): 75-84.
- UN Department of Economic and Social Affairs, 2014. *World Urbanization Prospects, the 2014 Revision Highlights*. New York: UN Department of Economic and Social Affairs.
- Weng Q H, 2003. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect[J]. *Photogr Eng Remote Sens*, 69(5): 555-566.
- Yang P, Ren G Y, Liu W D, 2013. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban Heat Island intensity[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 52(8): 1803-1816.
- Zhang K X, Wang R, Shen C C, et al, 2010. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island during rapid urbanization in Shanghai, China[J]. *Environ Monitor Assess*, 169(1/2/3/4): 101-112.
- Zhao M Y, Cai H Y, Qiao Z, et al, 2016. Influence of urban expansion on the urban heat island effect in Shanghai[J]. *Int J Geogr Inf Syst*, 30(12): 2421-2441.