程志刚, 李炬, 周明煜, 等. 2018. 北京中央商务区（CBD）城市热岛效应的研究 [J]. 气候与环境研究, 23 (6): 633−644. Cheng Zhigang, Li Ju, Zhou Mingyu, et al. 2018. A study on urban heat island effect in Beijing central business district (CBD) [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (6): 633−644, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17036.

北京中央商务区（CBD）城市热岛效应的研究

程志刚[1] 李炬[1] 周明煜[2] 窦军霞[1] 曹晓彦[1] 张京江[1] 张鑫宇[1] 贺晓冬[1]

1 中国气象局北京城市气象研究所，北京 100089
2 国家海洋环境预报中心，北京 100081

摘 要 利用 2012～2013 年北京中央商务区（Central Business District，CBD）加密观测资料，分析 CBD 区域城市热岛（Urban Heat Island，UHI）强度日变化和空间变化特征及其影响因子。研究发现，CBD 区域气温高于周边自动站气温，平均偏高 0.64 ℃；CBD 区域城市热岛强度呈现夜间强、白天弱的现象，中午甚至存在“城市冷岛”现象。季节平均 UHI 日变化表现为：在夜间，秋季最强，冬季次之，春季和夏季较弱；在白天，夏季最强，冬季次之，春季和秋季较弱。相对于晴朗无风天气，雾、雨、大风等天气对城市热岛有抑制作用，并结合小波分析结果发现，秋季城市热岛强度强于冬季是由于冬季雾、雨、大风等天气过程发生比例较高的缘故。CBD 区域城市热岛空间变化特征研究发现，花园、学校等绿地有助于缓解城市热岛效应。雾日、雨日和大风日的 CBD 区域城市热岛强度空间变化标准差比晴朗无风日小。

关键词 中央商务区 城市热岛 天气类型 季节变化

文章编号 1006-9585（2018）06-0633-12 **中图分类号** P463.3 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17036

A Study on Urban Heat Island Effect in Beijing Central Business District (CBD)

CHENG Zhigang[1], LI Ju[1], ZHOU Mingyu[2], DOU Junxia[1], CAO Xiaoyan[1], ZHANG Jingjiang[1], ZHANG Xinyu[1], and HE Xiaodong[1]

1 *Institute of Urban Meteorology*, *Beijing* 100089
2 *National Marine Environment Forecast Center*, *Beijing* 100081

Abstract The diurnal and spatial variations of urban heat island (UHI) and their influence factors in Beijing central business district (CBD) are investigated by using the dense air temperature data measured in this area during 2012−2013. The results illustrate that the CBD air temperature was 0.64 °C higher than the surrounding area. And the UHI in the CBD was stronger in the nighttime and weaker during the daytime, while the “urban cold island” even occurred at the noon. Analysis of seasonal means of the UHI shows that the strongest UHI in the nighttime occurred in the autumn, followed by that in the winter, and the weakest UHI occurred in the spring and summer. During the daytime, the strongest UHI occurred in the summer, followed by that in the winter and the weakest UHI was found in the spring and autumn. Foggy, rainy, and windy days could restrain the UHI compared to the situation in sunny days. Combined with the wavelet

收稿日期 2017-03-06；**网络预出版日期** 2017-11-29

作者简介 程志刚，男，1991 年出生，硕士，工程师，主要研究领域为城市气象探测与边界层分析。E-mail: zgcheng@ium.cn

资助项目 国家国际科技合作专项项目“京津冀城市群强降水及雾霾观测试验”2015DFA20870，国家自然科学基金项目 41505102，北京市气象局科技项目 BMBKJ201701002

Funded by International Science and Technology Cooperation Program of China (Grant 2015DFA20870), National Natural Science Foundation of China (Grant 41505102), Science and Technology Project of Beijing Meteorological Bureau (Grant BMBKJ201701002)

analysis results, the reason why the UHI in the autumn was stronger than in the winter is attributed to the high occurrence frequencies of foggy, rainy, and windy days in the winter. Analysis of the UHI spatial variation in the CBD shows that gardens, schools and other public lands could ease the UHI effect. And the standard deviation of spatial variation of the UHI in the CBD in foggy, rainy and windy days was smaller than that in sunny days.

Keywords Central business district (CBD), Urban heat island, Weather type, Seasonal variation

1 引言

城市热岛（Urban Heat Island，UHI）效应是一种随着城市化高速发展，受城市下垫面和人为热等影响，城区气温高于郊区的城市气象，其中城市热岛强度可用城区气温减去郊区气温的差值表征。城市热岛对居住环境、人类健康等有重大影响（张雷等，2015）。中央商务区（Central Business District，CBD）是一个城市的功能核心区。北京 CBD 区域建筑总规模达 1050×10^4 m^2，集中了北京市 50%以上的甲级写字楼和星级酒店，约 70%的世界 500 强企业，规模以上企业 8900 家（北京商务中心区管理委员会，2018）。作为一个人口、商业密集型和高城市化区域，研究 CBD 区域气候特征是非常有必要的。

很多学者研究了城市热岛效应变化特征及其影响，肖荣波等（2005）从生态环境效应方面阐述了城市热岛对城市气候、大气环境以及生物习性等方面的影响。郑祚芳等（2006）、王建凯等（2007）和 Yang et al.（2013）等研究发现，北京和首尔城市热岛强度均表现出冬季大于夏季，夜间大于白天的特征。于淑秋等（2005）和宫阿都等（2005）同样发现北京城市热岛存在显著地季节变化，冬季最强，春、秋季次之，夏季最弱，并指出城市热岛指数具有显著地年际增温。刘勇洪等（2014）对城市热岛模拟结果显示，到 2020 年北京城市热岛由“摊大饼”演变为“中心＋周边分散”模式。孙继松和舒文军（2007）、郑祚芳等（2014）从热岛环流的角度分析了北京城市热岛对降水的影响。也有学者做过 CBD 区域城市热环境研究，He et al.（2015）分析了 CBD 区域天穹可见度对室外温度的影响。张本志等（2013）因朝阳站位于城区，定义 CBD 与朝阳站温差为附加城市热岛效应，同样发现附加城市热岛效应夜间最强，并受云、风等影响。

李丽光等（2011）研究发现，晴朗无风天气城市热岛日变化强于大风、雾、降水等天气，并指出雾、强风速和降水均会抑制城市热岛效应。王喜全等（2006）同样指出多云和大风天气会削弱城市热岛效应。Morris et al.（2001）研究发现，微风少云天气城市热岛强度最强，大风多云天气城市热岛强度较弱。Kim and Baik（2005）、Schatz and Kucharik（2014）同样指出随着风速和云量增加，城市热岛减弱，并且在午后会出现‘城市冷岛’现象。李耀锟等（2015）指出气溶胶的散射作用要大于吸收作用，对城市热岛起削弱作用。朱焱等（2016）发现城市热岛能够减弱地面气溶胶浓度，增大上空气溶胶浓度。宫阿都等（2007）、徐涵秋和陈本清（2004）、乔治和田光进（2015）均发现城市地表植被覆盖能够有效降低城市热岛。Cui and De Foy（2012）模式模拟结果也表明，增大城市绿植覆盖范围能够有效降低城市热岛。李兴荣等（2007）研究发现，白天日照充足，夜间城郊均维持弱的地面风场以及夜间城区近地层逆温，会加强夜间城市热岛。

寿亦萱和张大林（2012）和白杨等（2013）对城市热岛效应研究进展总结均指出，研究城市热岛主要有自动站观测、遥感观测、数值模拟等方法。本文研究的 CBD 区域具有较大的社会经济效益，而且有区域加密观测资料，因此本文研究中采用加密观测资料分析北京 CBD 城市热岛日变化和空间变化特征及其影响因子。

2 观测场地、资料和方法

本文所利用的资料是 2012～2013 年“北京中央商务区（CBD）热环境观测”实验数据（李炬和窦军霞，2014；张本志等，2013），北京自动站数据。CBD 热环境观测实验是在北京朝阳区 CBD 一块 1.47 km ×0.88 km 的范围内，使用美国 ONSET 公司 HOBO Pro v2 温、湿度采集器建立 32 个观测点（图 1b），观测温度和相对湿度的变化，采样频率为 5 min，测量精度分别为±0.21°C 和±2.5%。仪器主要架设在路边的灯杆上，平均架设高度为 2.79 m，采用防辐射罩去除太阳直接辐射的影响。本文选取 29 个有效观测点 2012 年 6 月 1 日至 2013 年 5 月 31 日的数据分析 CBD 城市热岛效应，站点信息见表 1。由于夜间城市热岛强度与白天的太阳辐射有很大关系，因此本

文定义早晨 06:00(北京时间,下同)至次日早晨 06:00 为一天。本文所采用的温度质量控制方法为极值检查、时间连续性检查（窦以文等，2008）。

表 1 北京 CBD 区域加密观测点经纬度和安装高度

Table 1 Longitudes, latitudes, and heights of dense observational sites in Beijing CBD (Central Business District)

编号	经度	纬度	安装高度/m	编号	经度	纬度	安装高度/m
01	116.451°E	39.915°N	2.50	16	116.450°E	39.915°N	2.70
02	116.447°E	39.914°N	2.55	17	116.452°E	39.907°N	2.80
03	116.449°E	39.908°N	2.64	18	116.444°E	39.917°N	2.56
04	116.448°E	39.919°N	2.65	19	116.455°E	39.914°N	3.20
05	116.444°E	39.914°N	3.00	20	116.455°E	39.908°N	2.46
06	116.455°E	39.917°N	3.00	21	116.446°E	39.910°N	2.90
07	116.451°E	39.912°N	3.00	22	116.444°E	39.909°N	2.50
08	116.446°E	39.907°N	3.00	23	116.444°E	39.911°N	3.00
09	116.451°E	39.911°N	2.72	24	116.451°E	39.911°N	2.28
10	116.448°E	39.915°N	3.00	25	116.448°E	39.912°N	2.56
11	116.455°E	39.911°N	3.00	26	116.444°E	39.915°N	2.53
12	116.452°E	39.919°N	3.00	27	116.446°E	39.918°N	2.86
13	116.444°E	39.919°N	3.00	28	116.444°E	39.921°N	2.50
14	116.455°E	39.912°N	3.00	29	116.451°E	39.918°N	3.00
15	116.452°E	39.912°N	3.00				

3 CBD 区域 UHI 变化特征

CBD 加密观测仪器防辐射设备为防辐射罩，朝阳、大兴等国家级气象观测站是百叶箱。严家德等（2014）和王志成等（2015）指出太阳辐射、风速会对不同防辐射罩内温度探测有影响。为对比防辐射罩和百叶箱对温度的影响，在朝阳站进行了对比试验：2016 年 1 月 13 日至 3 月 1 日在朝阳站架设与 CBD 区域同型号同防辐射罩的观测设备，与朝阳站百叶箱温度对比分析。结果发现：防辐射罩温度平均比百叶箱温度高 0.40 °C，白天平均高 0.79 °C，夜晚温度基本相当（差异小于 0.01 °C），说明防辐射罩和百叶箱的通风系数相差不大，因此白天防辐射罩温度高于百叶箱温度主要是由于百叶箱的防辐射性能比防辐射罩强的缘故。由于两种温度夜晚差异很小，而本文研究主要集中在夜间 UHI 强度分析，因此本文没有对 CBD 温度订正。为了分析 CBD 整体 UHI 状况，将 29 个加密观测点气温平均作为 CBD 区域气温。

位于北京南六环附近的大兴站（DAX）是国家级气象观测站，属于郊区，拥有标准观测场，观测资料可靠稳定，与 CBD 距离为 23.2 km；观象台站（54511）位于北京南五环之内，其与 CBD 和大兴站的距离分别为 12.2 km 和 13.8 km; 房山站（FAN）位于北京西南部，其与 CBD 距离为 33.4 km（分布图见图 1a）。朝阳站（CHA）位于城区，随着城市发展，54511 也具备了城市特征，图 2b 显示其平均温度高于朝阳站，因此以 CHA 和 54511 为郊区站研究城市热岛已不合适；房山站距离 CBD 太远，其可能受北京西部山区的影响。基于站点周边环境、资料稳定性等因素（例如通州站建于楼顶，不适合作为郊区站），本文选择大兴站而非郊区站平均研究 CBD 区域城市热岛变化特征。

图 2a 为 CBD 年平均和季节平均 UHI 日变化。由图可知，CBD 年平均和季节平均 UHI 均表现为：夜间强,白天弱,中午甚至出现“城市冷岛”现象(城区气温低于郊区)。考虑防辐射性能差异，中午“城市冷岛”效应是存在的，甚至更强。季节平均 UHI 日变化表现为：在夜间，秋季最强，冬季次之，春季和夏季较弱；在白天，夏季最强，冬季次之，春季和秋季较弱，甚至出现“城市冷岛”现象（图 2a 和表 2）。

为排除城市建筑物遮挡作用，选取天穹可见度（Sky View Factor，SVF）较高和较低的观测点进行 UHI 对比分析（图略），发现当 SVF 较高（建筑物遮挡较小）时，中午“城市冷岛”效应同样存在，但强度比 SVF 较低时有所降低，说明城市建筑物遮挡对“城市冷岛”效应有一定促进作用，但是还有其他因素的影响，有待于进一步研究。

图 2a 和表 2 的结果均显示 CBD 秋季 UHI 强度最强，尤其是在夜间。这与前人研究成果中冬季 UHI 强度最强不同（于淑秋等，2005；谢庄等，2006；郑祚芳等，2006）。这种不同是地域差异造成的，还是不同年份的差异？为此，给出了工体站（GON）和复兴门站（FUX）UHI 强度日变化（图 3）。工体站是距 CBD 区域最近的自动气象站,距离仅 1.8 km 左右，复兴门站位于西二环,均属于城市地区。由图 3 可知，工体站和复兴门站年平均和季节平均 UHI 在夜间均为秋季最强，冬季次之，春季和夏季较弱，与 CBD 区域 UHI 一致,因此 CBD 夜间秋季 UHI 最强并不是地域差异造成的。分析 CBD、工体站和 54511 站温度差异（图 2b 和表 2）发现，CBD 温度平均比工体站高 0.64 °C，比 54511 站高 1.14 °C，CBD 温度高于周边城市区域，说明城市化发展越高的区域 UHI 越强。

为确定 CBD 区域 UHI 秋季最强是否与资料年份有关。由于没有 CBD 长时间温度资料，因此本

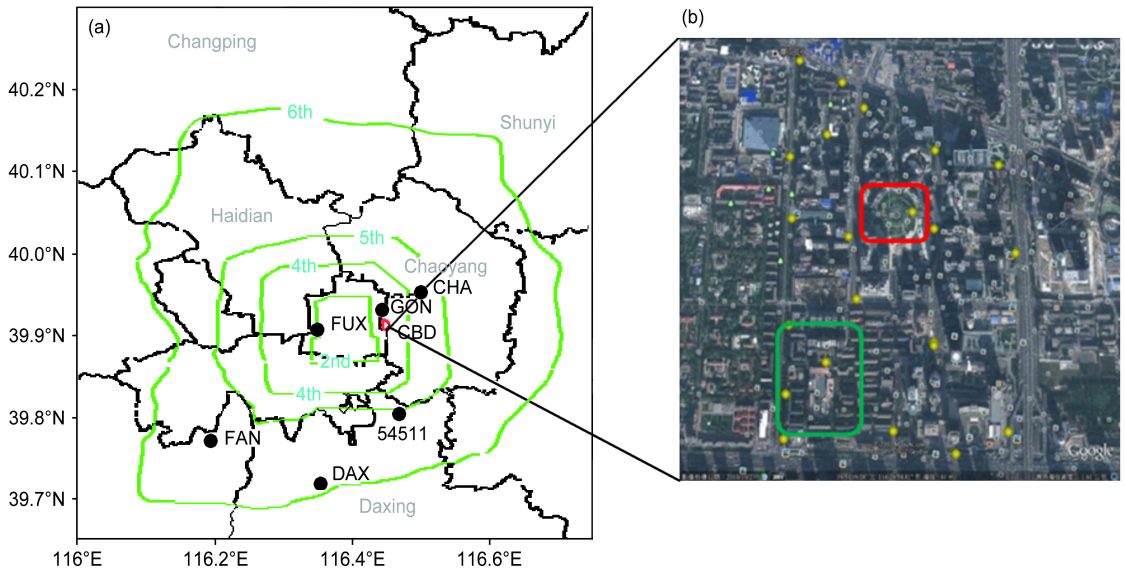

图 1 （a）北京 CBD 区域位置和各个观测站点分布（工体站：GON；朝阳站：CHA；复兴门站：FUX；观象台站：54511；大兴站：DAX；房山站：FAN）；（b）北京 CBD 区域加密观测点分布（黄点），其中红色方框区域为 CBD 历史文化公园，绿色方框区域为日坛中学，其余区域主要为工作写字楼和商场

Fig. 1 (a) Location of the Beijing CBD and distribution of observational stations (Gongti: GON, Chaoyang: CHA, Fuxingmen: FUX, Guangxiangtai: 54511, Daxing: DAX, Fangshan: FAN). (b) Distribution of observational sites in Beijing CBD (yellow points). The red rectangles denote historical and cultural parks, and the green rectangle indicates Ritan middle school, the other areas are mainly occupied by office buildings and supermarkets

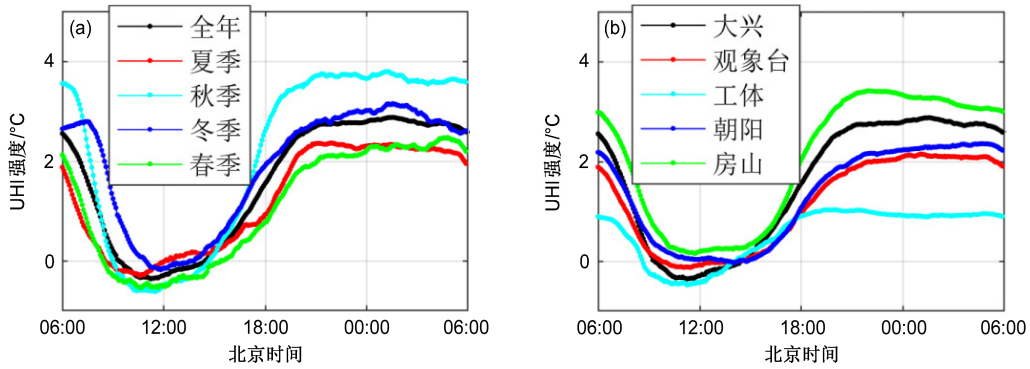

图 2 2012～2013 年北京 CBD 区域 UHI 强度日变化：（a）以大兴站为郊区站的全年、夏季、秋季、冬季、春季平均 UHI 强度日变化；（b）以大兴、观象台、工体、朝阳、房山站为郊区站全年平均 UHI 强度日变化

Fig. 2 Diurnal variations of UHI (Urban Heat Island) intensity in Beijing CBD for the period of 2012−2013: (a) Annual and seasonal (spring, summer, autumn, winter) averages using DAX as the rural station; (b) annual averages using DAX, GUA, GON, CHA, and FAN as rural stations all year round

表 2 年平均和各季节平均的日平均温度差值和夜间温度差值。CBD-DAX 和 CBD-FAN 分别为以大兴站（DAX）和房山站（FAN）为郊区站点 CBD 区域 UHI 强度，CBD-GON 为 CBD 区域与工体站（GON）温度差异，GON-DAX 为工体站（GON）和大兴站（DAX）温度差异，CBD-54511 为 CBD 区域和南郊观象台（54511）温度差异，54511-DAX 为南郊观象台（54511）和大兴站温度差异

Table 2 Annual and seasonal means of daily and nighttime averages of temperature differences between CBD and Daxing (CBD-DAX), between CBD and Fanshan (CBD-FAN), between CBD and Gongti (CBD-GON), between Gongti and Daxing (GON-DAX), between CBD and Guanxiangtai (CBD-54511), and between Guanxiangtai and Daxing (54511-DAX)

	温度差异/°C					
	CBD-DAX	CBD-FAN	CBD-GON	GON-DAX	CBD-54511	54511-DAX
年平均	1.66(2.64)	2.13(3.12)	0.64(0.95)	1.02(1.69)	1.14(1.91)	0.52(0.73)
夏季平均	1.25(2.14)	1.72(2.49)	0.52(0.90)	0.73(1.24)	0.74(1.27)	0.51(0.87)
秋季平均	2.33(3.58)	2.76(4.07)	1.07(1.19)	1.26(2.39)	1.33(2.33)	1.00(1.25)
冬季平均	1.96(2.78)	2.63(3.57)	0.64(0.75)	1.32(2.03)	1.43(2.15)	0.53(0.63)
春季平均	1.13(2.05)	1.42(2.38)	0.32(0.88)	0.81(1.17)	1.07(1.89)	0.06(0.16)

注：括号外和括号内数值分别代表日平均温度差值和夜间平均温度差值。

文用距CBD最近的工体站表征城区，给出了2009～2014 年工体站 UHI 日变化（图 4）。由图 4 可知，近 6 年的年平均和季节平均 UHI 均为夜间强，白天弱。2009 年、2010 年和 2014 年夜间 UHI 秋、冬季较强，但秋季和冬季之间的差异不明显；2011 年和 2012 年夜间 UHI 秋季强于冬季，春季和夏季较弱；2013 年夜间 UHI 冬季强于秋季，夏季最弱。

表 3 给出了 2009～2014 年工体站年平均和季节平均 UHI 强度，分析发现近 6 年 UHI 强度呈现逐年递增的趋势，并且递增的趋势越来越强，除了 2009 年比 2010 年略强外，说明缓解城市热岛效应的措施还有待加强。季节平均 UHI 表明，秋季和冬季平均 UHI 强度明显强于春季和夏季。这里 2012 年秋季平均 UHI 强度略偏低于冬季，这主要是由于工体站秋季白天 UHI 强度明显低于冬季，这与秋季晴朗无风日天数最多有关（表 4）。

表 3 2009～2014 年 6 年以大兴站为郊区站点工体站 UHI 强度

Table 3 Annual and seasonal means of daily and nighttime averages of UHI intensity at Gongti station during 2009–2015

	工体站 UHI 强度/℃					
	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
年平均	0.94(1.47)	0.92(1.55)	0.96(1.60)	1.01(1.65)	1.09(1.76)	1.20(1.91)
夏季平均	0.91(1.35)	0.88(1.31)	0.53(0.83)	0.73(1.21)	0.68(0.76)	1.16(1.79)
秋季平均	1.14(1.90)	1.02(2.00)	1.23(2.21)	1.25(2.30)	1.19(2.20)	1.25(2.18)
冬季平均	1.12(1.90)	1.09(1.96)	1.18(2.09)	1.30(1.98)	1.53(2.58)	1.40(2.21)
春季平均	0.49(0.74)	0.55(0.96)	0.73(1.28)	0.80(1.13)	0.97(1.52)	0.99(1.46)

注：括号外和括号内数值分别代表日平均温度差值和夜间温度差值。

表 4 2012～2013 年 4 个季节、全年、9 月、10 月、11 月、11 月供暖前和 11 月供暖后晴朗无风日数、雾日数、雨日数、大风日数以及雾、雨、大风天数与晴朗无风日比值

Table 4 Numbers of fine days, foggy days, rainy days, windy days, and ratios of numbers of foggy, rainy, and windy days to fine days during the summer, autumn, winter, spring, the entire year, September, October, November, November before and after anthropogenic heating during the period of 2012 to 2013

	晴朗无风日数/d	雾日数/d	雨日数/d	大风日数/d	雾、雨、大风天数与晴朗无风日比值
夏季	5	4	42	0	9.20
秋季	21	2	18	4	1.14
冬季	14	15	13	8	2.57
春季	4	0	13	9	5.50
全年	44	21	86	21	2.91
9 月	7	0	9	1	1.43
10 月	8	1	4	0	0.63
11 月	6	1	5	3	1.50
11 月供暖前	4	0	3	1	1.00
11 月供暖后	2	1	2	2	2.50

由此可知，CBD 秋季夜间 UHI 最强并非区域差异造成，不同年份也有同样情况出现，属于城市热岛效应的年际变化。以下对造成这种情况的原因作进一步分析。

4 CBD 区域 UHI 影响因子的研究

城市热岛主要受城市建筑和人为热的影响，在秋冬季节，城市供暖是人为热主要来源。2012 年北京市统一供暖时间为 2012 年 11 月 15 日至 2013 年 3 月 15 日。图 5 给出了不同时段 CBD 区域 UHI 日变化，在秋季的 3 个月中，夜间 UHI 强度相差较大，10 月最强，11 月最弱；白天 UHI 总体相差不大。对比供暖前和供暖后 11 月 UHI 日变化发现，供暖后夜间 UHI 强度明显增强，说明城市供暖会明显加强 UHI。

对 CBD 区域 UHI 强度做小波分析（图 6a、6b），结果表明其 1 天周期通过了 95%信度检验，还存在 1 天以内的周期，但是整体上并没有通过显著性检验。分析不同时段 UHI 小波分析结果发现，秋、冬季的 1 天周期比春、夏季显著；对比秋季和冬季 UHI 的 1 天周期发现，秋季强于冬季。而 UHI 日变化的主要影响因子是降水、大风、雾等天气过程（李丽光等，2011）。

下垫面、人为热、天气过程等均影响 UHI 强度。本文研究时段中，下垫面不变，冬季受到城市供暖的影响，但秋季 UHI 强于冬季，说明影响 UHI 强度的影响因子中有强于城市供暖的。CBD 区域 UHI 小波分析结果表明，UHI 的 1 天周期也有明显的季节变化，这种变化可能与天气过程有关。因此，本文将从降水、大风、雾等天气过程分析其对 UHI 的影响。

本文中将总云量低于 2 成，无低云，风速小于 2.0 m/s 的天气定义为晴朗无风日；将风速达到 5 级及以上的天气定义为大风日；将 24 h 累积雨量大于 0.1 mm 的天气定义为雨日；将水平能见度低于 1.0 km 的天气定义为雾日（李丽光等，2011）。统计不同天气过程 CBD 区域 UHI 日变化（图 7）发现，对于夜间 UHI，晴朗无风日有正贡献，增强了 2 °C 左右，雾日影响不大，雨日和大风日均有负贡献，减弱了 UHI 强度。对于白天 UHI，雾日有明显正贡献，雨日和晴朗无风日影响不大，大风日有负贡献。总的来说，在夜间，晴朗无风日有利于城市热岛效

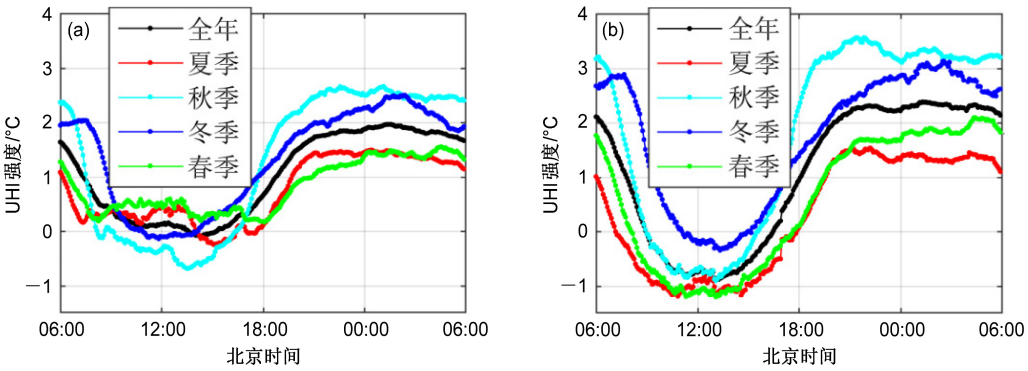

图 3　2009～2014 年以大兴站为郊区站工体站（GON-DAX）和复兴门站（FUX-DAX）UHI 强度全年、夏季、秋季、冬季、春季平均日变化

Fig. 3　Annual and seasonal (spring, summer, autumn, winter) averages of UHI intensity defined by temperature differences between Gongti and Daxing stations (GON-DAX), and between Fuxingmen and Daxing stations (FUX-DAX) during 2009−2014

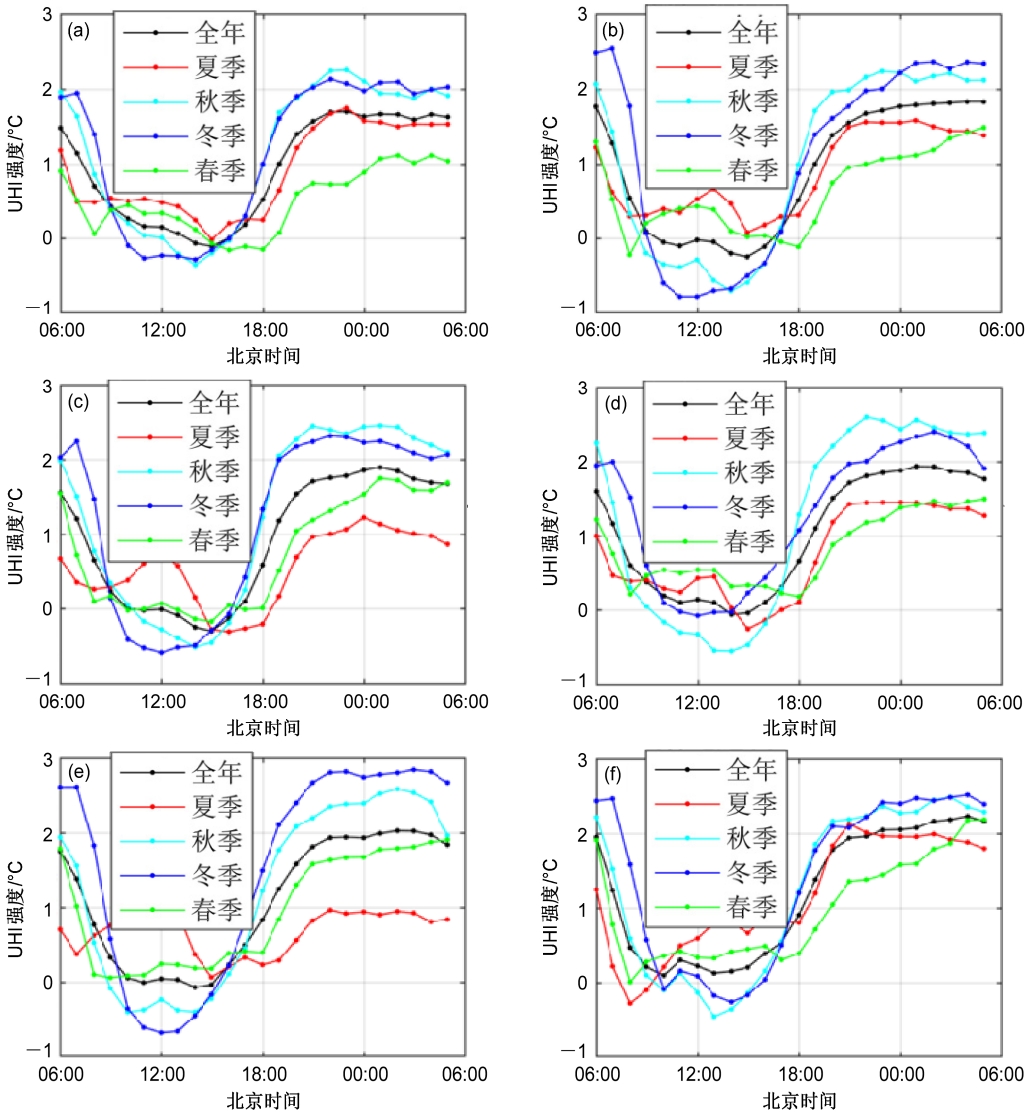

图 4　2009~2014 年以大兴站为郊区站工体站 UHI 强度（GON-DAX）全年、夏季、秋季、冬季、春季平均日变化：（a）2009 年；（b）2010 年；（c）2011 年；（d）2012 年；（e）2013 年；（f）2014 年

Fig. 4　Annual and seasonal (spring, summer, autumn, winter) averages of UHI intensity defined by temperature differences between Gongti and Daxing stations (GON-DAX) during 2009−2014: (a) 2009; (b) 2010; (c) 2011; (d) 2012; (e) 2013; (f) 2014

应的发生发展，雾日、雨日和大风日抑制了城市热岛效应；在白天，雾日和雨日对城市热岛效应有正贡献，其中雾日的 UHI 强度最强，晴朗无风日和大风日均减弱了城市热岛效应。从 UHI 日变化角度来说，晴朗无风日加强了 UHI 日变化，雾日、雨日和大风日均减弱了 UHI 日变化。

表 4 统计了不同时段下天气过程的天数。由表 4 可知，秋季和冬季晴朗无风日天数较多，这也是秋、冬季 UHI 较强的原因之一。全年的雾日、雨日和大风日的天数与晴朗无风日天数的比例为 2.91:1，春、夏季明显高于这个比例，秋、冬季明显低于这个比例，这也就解释了为什么秋、冬季 UHI 的 1 天周期较强，春、夏季 UHI 的 1 天周期较弱。

秋季的雾日、雨日和大风日的天数与晴朗无风日的比例为 1.14:1，冬季的为 2.57:1，是秋季的 2 倍多，这也解释了为什么冬季在城市供暖的大背景下，UHI 仍低于秋季。说明当雾日、雨日、大风日的天气过程发生比例较高时，对 UHI 的影响能够超过城市供暖。结合图 5，10 月和 11 月份天气过程天数（表 4）更为直观地阐释了这个结论。

由表 3 可知，2013 年冬季 UHI 明显强于秋季，这与 2012 年 CBD 结果相反。自 2014 年 1 月 1 日起，北京自动站停止了天空云量的人工观测，因此无法统计 2013 年之后的晴朗无风日天数。但 2013 年小波分析结果（图 6c 和图 6d）显示，秋、冬季的 1 天周期都比较强，并且 1 天周期在整个冬季都比较显著，说明破坏 1 天周期的雨日、雾日和大风日天气过程较少发生。因此，晴朗无风日、雨日、雾日、大风日天气过程对季节城市热岛强度的影响不仅仅发生在 2012 年，同样发生在其余年份。

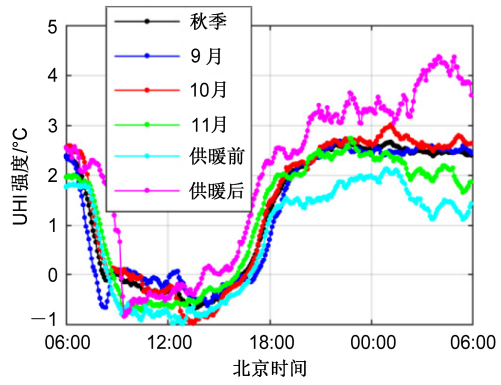

图 5　秋季、9 月、10 月、11 月、11 月供暖前和 11 月供暖后北京 CBD 区域 UHI 强度日变化

Fig. 5　UHI intensity in Beijing CBD in the autumn, September, October, November, and November before and after anthropogenic heating

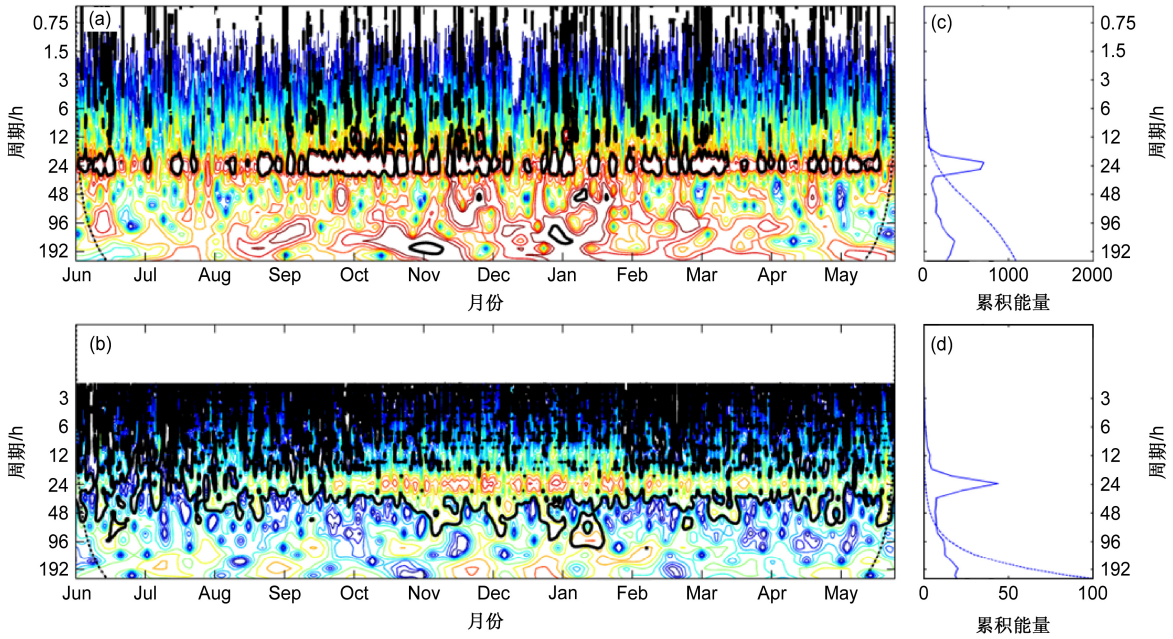

图 6　（a、c）2012～2013 年北京 CBD 区域和（b、d）2013～2014 年工体站 UHI 强度小波能量谱（左列，通过 95%信度检验的区域以黑色实线标出）和累积能量（右列）

Fig. 6　Wavelet power spectra (left column, the area passing the 95% confidence level is indicated by black line) and cumulative power (right column) of UHI intensity in (a, c) in Beijing CBD during 2012−2013 and (b, d) at Gongti during 2013−2014

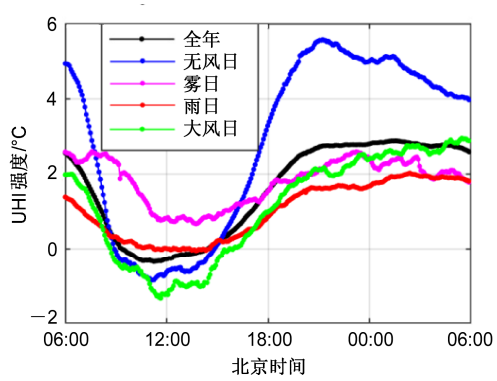

图 7 2009～2014 年全年、晴朗无风日、雾日、雨日、大风日平均北京 CBD 区域 UHI 强度日变化

Fig. 7 Diurnal variations of the UHI intensity in Beijing CBD averaged over the entire year, fine days, foggy days, rainy days, and windy days during 2009−2014

5 CBD 区域 UHI 空间变化特征

图 1 给出了 CBD 区域下垫面类型：北部中心区域为 CBD 历史文化公园（图 1b 红色方框区域），西南部为公寓类住宅和日坛中学（图 1b 黄色方框区域），其余区域主要为办公写字楼，不同下垫面会导致 UHI 空间分布不均匀。

图 8 为不同时段 CBD 区域 UHI 强度空间分布。为更客观地显示空间差异性，按照±2 倍标准差剔除了异常值，表 5 给出了不同时段去除异常值之后的有效站点数。由图 8 可知，年平均 UHI 空间分布受下垫面类型影响较大，学校、公寓等和公园地区 UHI 强度较低，办公写字楼区域 UHI 强度较强。夏季和秋季 UHI 空间分布与年平均 UHI 空间分布类似，同样受下垫面类型影响较大，但是秋季由于落叶的影响，公园对 UHI 效应的减缓作用不明显。冬季由于城市供暖的影响，使得 UHI 较强且均匀，冬季的标准差相对于其余几个季节是最小的（表 5）。春季由于植被生长，公园等绿地对 UHI 效应有较强的缓解作用。

表 5 2012～2013 年全年、夏季、秋季、冬季、春季、晴朗无风日、雾日、雨日和大风日平均北京 CBD 区域 UHI 强度空间分布的有效站点数、UHI 强度北京平均值和标准差

Table 5 Number of valid stations, spatial averages and standard deviations of the UHI intensity in Beijing CBD for annual average and averages in the summer, autumn, winter, spring, fine days, foggy days, rainy days, and windy days during 2012−2013

	有效站点数	UHI 强度平均/°C	UHI 标准差
全年	27	1.53	0.12
夏季	27	1.17	0.15
秋季	29	2.10	0.26
冬季	27	1.88	0.09
春季	27	1.04	0.10
晴朗无风日	29	2.66	0.25
雾日	27	1.89	0.07
雨日	27	0.86	0.09
大风日	27	0.94	0.10

由图 9 和表 5 可知，晴朗无风日 UHI 空间变化与年平均类似，主要受下垫面的影响，在西南部的学校和公寓附近较低，在办公楼区域较高；雾日、雨日和大风日标准差明显比晴朗无风日小，空间分布并没有显著特征。

6 总结与讨论

通过加密观测资料分析，研究了北京 CBD 区域城市热岛效应时间和空间变化特征。以不同的远郊站点为郊区站，CBD 区域均存在显著的城市热岛效应，其中以大兴站为郊区站，其平均热岛强度为 1.66 °C。根据小波分析结果发现，CBD 区域城市热岛存在显著的 1 天周期（日变化），1 天以内的周期同样存在，但总体上没有通过显著性检验。其年平均和季节平均日变化均表现为夜间强、白天弱的特征，中午甚至出现“城市冷岛”效应，这种“城市冷岛”效应与城市建筑物的遮挡有一定关系。北京 CBD 区域城市热岛季节变化表现为秋季强于冬季，春、夏季较弱，这与前人研究成果中冬季 UHI 强度最强不同（于淑秋等，2005；谢庄等，2006；郑祚芳等，2006）。

研究 CBD 区域影响因子时发现雾日、雨日和大风日过程城市热岛强度弱于晴朗无风日，这与前人的研究结论一致（李丽光等，2011；王喜全等，2006）。结合秋、冬季城市热岛小波分析结果发现，2012～2013 年秋季热岛强度强于冬季主要是由于冬季雾日、雨日和大风日等抑制城市热岛强度的天气过程发生比例较高的缘故。

CBD 区域城市热岛空间分布特征表现为，花园、学校、公寓能有效缓解 CBD 区域城市热岛现象，办公楼集中区域城市热岛强度相对较强，这与前人的研究结果是一致的（Cui and De Foy，2012；乔治和田进光，2015）。雾日、雨日和大风日的城市

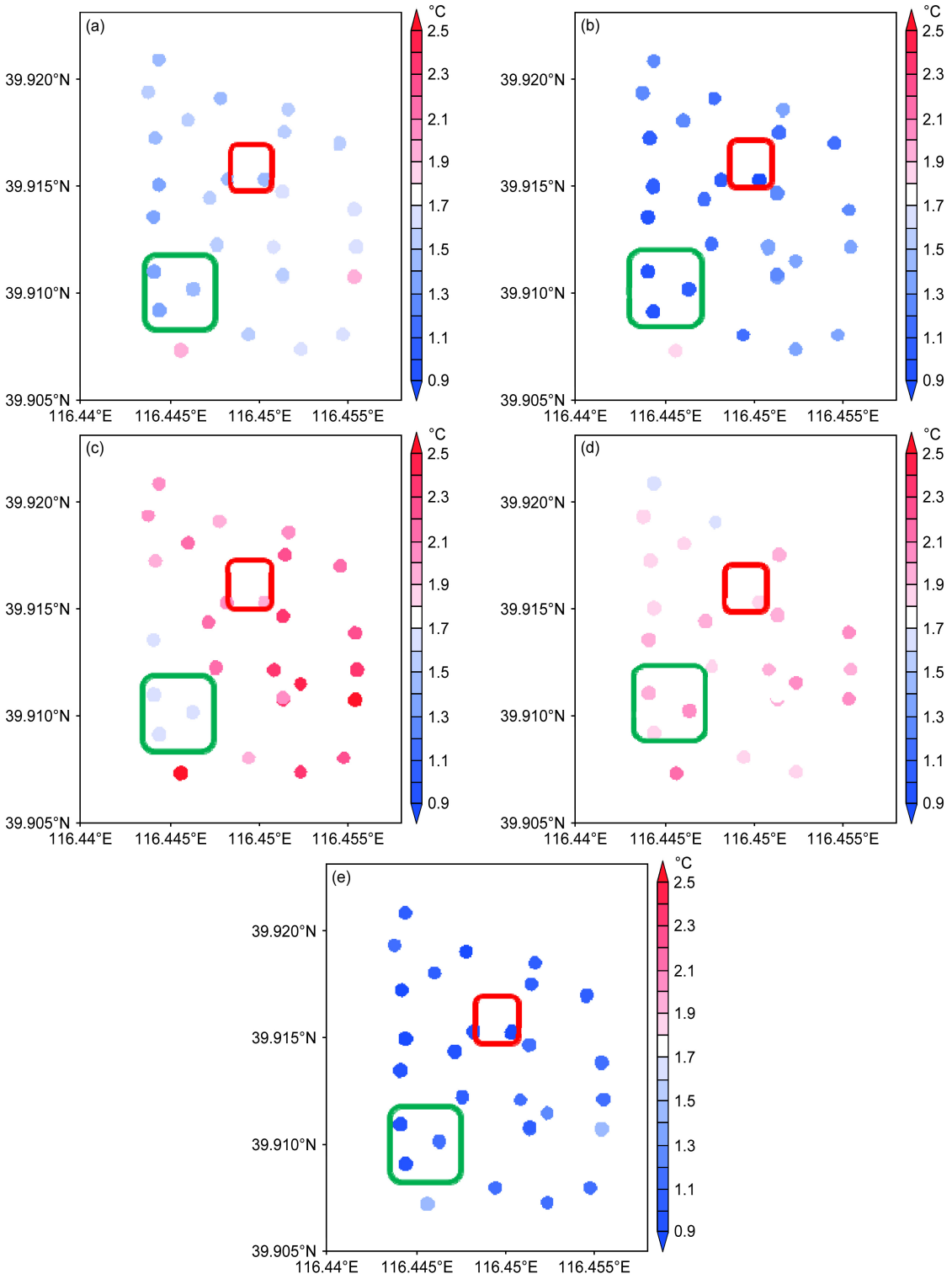

图 8　2012～2013 年 CBD 区域内各站点 UHI 强度空间分布：（a）年平均；（b）夏季平均；（c）秋季平均；（d）冬季平均；（e）春季平均。红色方框区域为 CBD 历史文化公园，绿色方框区域为日坛中学

Fig. 8　Spatial distributions of the average UHI intensity in the CBD during 2012−2013 for (a) the entire year, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, and (e) spring. The red (green) rectangle denotes the historical and cultural park (the Ritan middle school) in CBD as shown in Fig. 1b

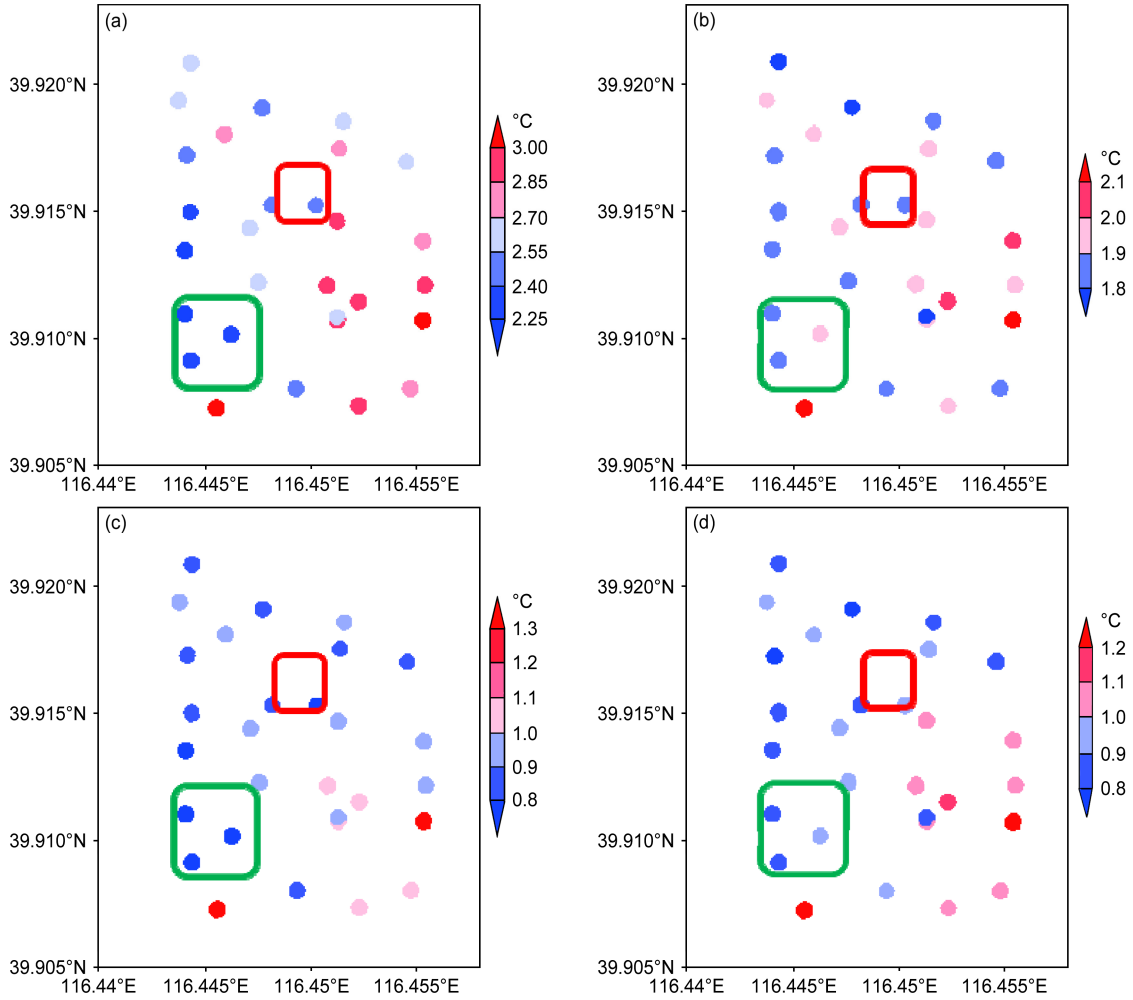

图 9 2012～2013 年 CBD 区域内各站点 UHI 强度空间分布：（a）晴朗无风日平均；（b）雾日平均；（c）雨日平均；（d）大风日平均

Fig. 9 Spatial distributions of the average UHI intensity in the CBD during 2012-2013 for (a) fine days, (b) foggy days, (c) rainy days, and (d) windy days

热岛强度明显低于晴朗无风日的热岛强度，其空间变化标准差同样比晴朗无风日小，空间差异并不显著。

现如今，可以用卫星监测地面温度来计算城市热岛。但是卫星分辨率较低，并不能直接监测 CBD 区域这种高城市化小范围的城市热岛现象。未来，可以利用加密观测资料对卫星资料进行订正，这样就能监测更小尺度区域的温度，对城市热岛的研究有重大意义。

致谢 感谢北京市朝阳区气象局张子曰提供的防辐射罩和百叶箱温度对比试验数据及其对北京 CBD 区域加密观测资料的解释说明。

参考文献 (References)

白杨, 王晓云, 姜海梅, 等. 2013. 城市热岛效应研究进展 [J]. 气象与环境学报, 29 (2): 101–106. Bai Yang, Wang Xiaoyun, Jiang Haimei, et al. 2013. Progress of urban heat island effect [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 29 (2): 101–106, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2013.02.016.

北京商务中心区管理委员会. 2018. 北京商务中心区（CBD）概述 [DB/OL]. http://bjcbd.bjchy.gov.cn/content/4/. Beijing CBD management committee. 2018. Overview of Beijing CBD (in Chinese) [DB/OL]. http://bjcbd.bjchy.gov.cn/content/4/.

Cui Y Y, De Foy B. 2012. Seasonal variations of the urban heat island at the surface and the near-surface and reductions due to urban vegetation in Mexico City [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 51 (5): 855–868, doi:10.1175/JAMC-D-11-0104.1.

窦以文, 屈玉贵, 陶士伟, 等. 2008. 北京自动气象站实时数据质量控制应用 [J]. 气象, 34 (8): 77–81. Dou Yiwen, Qu Yugui, Tao Shiwei, et al. 2008. The application of quality control procedures for real-time data from automatic weather stations [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (8): 77–81.

宫阿都, 李京, 王晓娣, 等. 2005. 北京城市热岛环境时空变化规律研究 [J]. 地理与地理信息科学, 21 (6): 15–18. Gong Adu, Li Jing, Wang Xiaodi, et al. 2005. Study on temporal and spatial distribution

characteristics of the urban heat island in Beijing [J]. Geography and Geo-Information Science (in Chinese), 21 (6): 15–18, doi:10.3969/j.issn.1672-0504.2005.06.003.

宫阿都, 陈云浩, 李京, 等. 2007. 北京市城市热岛与土地利用/覆盖变化的关系研究 [J]. 中国图象图形学报, 12 (8): 1476–1482. Gong Adu, Chen Yunhao, Li Jing, et al. 2007. Study on relationship between urban heat island and urban land use and cover change in Beijing [J]. Journal of Image and Graphics (in Chinese), 12 (8): 1476–1482, doi:10.11834/jig.20070828.

He X D, Miao S G, Shen S H, et al. 2015. Influence of sky view factor on outdoor thermal environment and physiological equivalent temperature [J]. International Journal of Biometeorology, 59 (3): 285–297, doi:10.1007/s00484-014-0841-5.

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, doi:10.1175/JAM2226.1.

李炬, 窦军霞. 2014. 北京城市气象观测试验进展 [J]. 气象科技进展, 4 (1): 36–45. Li Ju, Dou Junxia. 2014. Progress in urban meteorological experiments in Beijing [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 4 (1): 36–45, doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2014.01.005.

李丽光, 梁志兵, 王宏博, 等. 2011. 不同天气条件下沈阳城市热岛特征 [J]. 大气科学学报, 34 (1): 66–73. Li Liguang, Liang Zhibing, Wang Hongbo, et al. 2011. Urban heat island characteristics in Shenyang under different weather conditions [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 66–73, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2011.01.009.

李兴荣, 胡非, 舒文军. 2007. 北京冬季城市热岛特征及强弱热岛影响因子研究 [J]. 中国科学院研究生院学报, 24 (4): 431–438. Li Xingrong, Hu Fei, Shu Wenjun. 2007. Research on the characteristics of Beijing winter UHI and the influencing factors of a strong UHI and a weak one [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 24 (4): 431–438, doi:10.3969/j.issn.1002-1175.2007.04.005.

李耀锟, 巢纪平, 匡贡献. 2015. 城市热岛效应和气溶胶浓度的动力、热力学分析 [J]. 地球物理学报, 58 (3): 729–740. Li Yaokun, Chao Jiping, Kuang Gongxian. 2015. Dynamic and thermodynamic analysis of the urban heat island effect and aerosol concentration [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 58 (3): 729–740, doi:10.6038/cjg20150303.

刘勇洪, 徐永明, 马京津, 等. 2014. 北京城市热岛的定量监测及规划模拟研究 [J]. 生态环境学报, 23 (7): 1156–1163. Liu Yonghong, Xu Yongming, Ma Jingjin, et al. 2014. Quantitative assessment and planning simulation of Beijing urban heat island [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 23 (7): 1156–1163, doi:10.3969/j.issn.1674-5906.2014.07.010.

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, doi:10.1175/1520-0450(2001)040<0169:QOTIOW>2.0.CO;2.

乔治, 田光进. 2015. 基于 MODIS 的 2001～2012 年北京热岛足迹及容量动态监测 [J]. 遥感学报, 19 (3): 476–484. Qiao Zhi, Tian Guangjin. 2015. Dynamic monitoring of the footprint and capacity for urban heat island in Beijing between 2001 and 2012 based on MODIS [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 19 (3): 476–484, doi:10.11834/jrs.20154165.

Schatz J, Kucharik C J. 2014. Seasonality of the urban heat island effect in Madison, Wisconsin [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53 (10): 2371–2386, doi:10.1175/JAMC-D-14-0107.1.

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 Yixuan, Zhang Dalin. 2012. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70 (3): 338–353, doi:10.11676/qxxb2012.031.

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 Jisong, Shu Wenjun. 2007. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 311–320, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.02.12.

王建凯, 王开存, 王普才. 2007. 基于 MODIS 地表温度产品的北京城市热岛（冷岛）强度分析 [J]. 遥感学报, 11 (3): 330–339. Wang Jiankai, Wang Kaicun, Wang Pucai. 2007. Urban heat (or cool) island over Beijing from MODIS land surface temperature [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 11 (3): 330–339, doi:10.11834/jrs.20070346.

王喜全, 王自发, 郭虎. 2006. 北京“城市热岛”效应现状及特征 [J]. 气候与环境研究, 11 (5): 627–636. Wang Xiquan, Wang Zifa, Guo Hu. 2006. The study of the urban heat island in Beijing City [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (5): 627–636, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2006.05.007.

王志成, 张雪芬, 雷勇, 等. 2015. 防辐射罩与百叶箱的防辐射性能比对分析 [J]. 气象水文海洋仪器, 32 (1): 50–54. Wang Zhicheng, Zhang Xuefen, Lei Yong, et al. 2015. Comparative analysis on anti-radiation performance of thermometer screen and radiation protection cover [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments (in Chinese), 32 (1): 50–54, doi:10.3969/j.issn.1006-009X.2015.01.010.

肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 等. 2005. 城市热岛的生态环境效应 [J]. 生态学报, 25 (8): 2055–2060. Xiao Rongbo, Ouyang Zhiyun, Li Weifeng, et al. 2005. A review of the eco-environmental consequences of urban heat islands [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 25 (8): 2055–2060, doi:10.3321/j.issn:1000-0933.2005.08.032.

谢庄, 崔继良, 陈大刚, 等. 2006. 北京城市热岛效应的昼夜变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (1): 69–75. Xie Zhuang, Cui Jiliang, Chen Dagang, et al. 2006. The annual, seasonal and monthly characteristics of diurnal variation of urban heat island intensity in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (1): 69–75, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2006.01.006.

徐涵秋, 陈本清. 2004. 城市热岛与城市空间发展的关系探讨——以厦门市为例 [J]. 城市发展研究, 11 (2): 65–70. Xu Hanqiu, Chen Benqing. 2014. A study on urban heat island and its spatial relationship with urban expansion: Xiamen, SE China [J]. Urban Studies (in Chinese), 11 (2): 65–70, doi:10.3969/j.issn.1006-3862.2004.02.014.

严家德, 金莲姬, 王巍巍, 等. 2014. 第二代自动气象站不同气温观测系统数据对比分析 [J]. 气象科学, 34 (1): 60–65. Yan Jiade, Jin Lianji, Wang Weiwei, et al. 2014. Comparisons of the different temperature observing systems of second generation AWS [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 34 (1): 60–65, doi:10.3969/2013jms.0029.

Yang P, Ren G Y, Liu W D. 2013. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52 (8): 1803–1816, doi:10.1175/JAMC-D-12-0125.1.

于淑秋, 卞林根, 林学椿. 2005. 北京城市热岛“尺度”变化与城市发展 [J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 35 (S1): 97–106. Yu Shuqiu, Bian Lingen, Lin Xuechun. 2005. Beijing urban heat island scale change and urban development [J]. Scientia Sinica (terrae D) (in Chinese), 35 (S1): 97–106, doi:10.3969/j.issn.1674-7240.2005.z1.009.

张本志, 任国玉, 张子曰, 等. 2013. 北京中心商务区夏季近地面气温时空分布特征 [J]. 气象与环境学报, 29 (5): 26–34. Zhang Benzhi, Ren Guoyu, Zhang Ziyue, et al. 2013. Temporal and spatial characteristics of summer near-surface air temperature in Beijing central business district [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 29 (5): 26–34, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2013.05.005.

张雷, 任国玉, 任玉玉. 2015. 单次极端高温过程中城市热岛效应的识别 [J]. 气候与环境研究, 20 (2): 167–176. Zhang Lei, Ren Guoyu, Ren Yuyu. 2015. Identification of urban effect on a single extreme high temperature event [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (2): 167–176, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13175.

郑祚芳, 刘伟东, 王迎春. 2006. 北京地区城市热岛的时空分布特征 [J]. 南京气象学院学报, 29 (5): 694–699. Zheng Zuofang, Liu Weidong, Wang Yingchun. 2006. Distributive character of urban heat island effect in the Beijing region [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29 (5): 694–699, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2006.05.017.

郑祚芳, 高华, 王在文, 等. 2014. 北京地区降水空间分布及城市效应分析 [J]. 高原气象, 33 (2): 522–529. Zheng Zuofang, Gao Hua, Wang Zaiwen, et al. 2014. Analysis on spatial distribution of precipitation in Beijing and its city effect [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33 (2): 522–529, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00193.

朱焱，刘红年，沈建，等. 2016. 苏州城市热岛对污染扩散的影响 [J]. 高原气象, 35 (6): 1584−1594. Zhu Yan, Liu Hongnian, Shen Jian, et al. 2016. Influence of urban heat island on pollution diffusion in Suzhou [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35 (6): 1584−1594, doi:10.7522/j.issn.1000-0534. 2016.00084.