

中国主要省会城市地表与冠层热岛日内逐时变化特征差异研究

苏博阳¹, 占文凤^{1,2}, 杜惠琳¹, 江斯达¹, 王晨光¹, 董攀¹,
王春丽¹, 刘紫涵³

1. 南京大学 国际地球系统科学研究所 江苏省地理信息技术重点实验室, 南京 210023;

2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023;

3. 安徽大学 人工智能学院, 合肥 230601

摘要: 探究城市地表热岛和冠层热岛日内逐时变化特征的差异有助于更好地理解城市热环境在精细时间尺度的垂向空间多层次演变规律。然而, 由于城市内部近地表空气温度观测站点分布较为稀疏, 并且极轨卫星提供的中高空间分辨率遥感地表温度数据局限于日内特定时刻, 这使得已有研究往往聚焦于单个或少数几个城市, 从而导致不同气候背景下城市地表与冠层热岛日内逐时变化特征差异尚不明晰。本研究以中国27个省会城市为研究区, 基于地表温度日循环模型对2017年—2019年MODIS地表温度产品模拟得到逐时地表温度, 利用1544个高密度气象站点的气温资料获取逐时空气温度, 探究地表与冠层热岛强度差值(ΔUHI)的逐时变化曲线的形态特征(含 ΔUHI 最大值和 ΔUHI 最小值及对应时刻、 $\Delta UHI > 0^\circ\text{C}$ 的持续时长等)。结果表明: (1) 就中国这27个城市平均而言, ΔUHI 日内变化曲线整体呈“山峰”形态, 且 ΔUHI 在日内24个时刻均为正值。具体而言, ΔUHI 从08:00开始迅速增大, 并于16:00前后达到最大值(1.7°C), 之后逐渐开始下降, 其中在日落时刻下降速率最大, 并于凌晨02:00达到最小值(0.1°C), 之后基本保持稳定; (2) 就不同气候区而言, 从南亚热带到温带, 随着城市所属气候区纬度的升高, ΔUHI 最大值和最小值逐渐减小, 其对应的日内时刻逐渐推迟, 且 $\Delta UHI > 0^\circ\text{C}$ 的持续时长也逐渐减小; (3) 就不同规模城市而言, 随着城市规模的增加, ΔUHI 最大值呈现不断减小的趋势, 其达到最大值的日内时刻逐渐提前, 且 $\Delta UHI > 0^\circ\text{C}$ 的持续时长逐渐增加。本研究明晰了较大地理空间范围下不同气候背景城市的2种热岛逐时变化特征差异, 有助于增进对精细时间尺度下城市热岛垂向空间特征的深入认知。

关键词: 地表热岛, 冠层热岛, 日内逐时变化, 气候区, 城市规模, 热红外遥感

中图分类号: TP79/P2

引用格式: 苏博阳, 占文凤, 杜惠琳, 江斯达, 王晨光, 董攀, 王春丽, 刘紫涵. 2024. 中国主要省会城市地表与冠层热岛日内逐时变化特征差异研究. 遥感学报, 28(8): 1885–1898

Su B Y, Zhan W F, Du H L, Jiang S D, Wang C G, Dong P, Wang C L and Liu Z H. 2024. Diurnal differences between surface and canopy heat islands in major provincial capital cities of China. National Remote Sensing Bulletin, 28(8): 1885–1898 [DOI: 10.11834/jrs.20243362]

1 引言

城市热岛效应 UHI (Urban Heat Island) 是城市气候的典型特征之一, 反映城区与郊区之间的热力差异 (Oke, 1995)。城市热岛效应不仅影响城市生态系统的结构和功能, 还可能会加剧城市居民健康风险 (Kim 和 Brown, 2021; 肖荣波等,

2005)。在全球变暖和城市局地气候变化双重影响背景下, 深入理解城市热岛时空特征是科学制定城市热岛缓解措施的重要前提 (孟庆岩等, 2022; 胡楠林等, 2022; 历华等, 2014; 周纪等, 2008)。

城市热岛可分为边界层热岛、冠层热岛、地表热岛和地下热岛4类 (江颂等, 2022)。其中, 冠层热岛 CUHI (Canopy layer UHI) 和地表热岛

收稿日期: 2023-08-22; 预印本: 2024-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42201337, 42171306)

第一作者简介: 苏博阳, 研究方向为城市热岛遥感。E-mail: mg21270105@smail.nju.edu.cn

通信作者简介: 占文凤, 研究方向为卫星热红外遥感与城市环境遥感。E-mail: zhanwenfeng@nju.edu.cn

SUHI (Surface UHI) 受到的关注最广泛 (Debbage 和 Shepherd, 2015; Peng 等, 2012)。冠层热岛和地表热岛在观测手段和形成机制方面存在显著差异。就观测手段而言, 冠层热岛主要通过气象站点观测的地表空气温度进行点状监测 (Oke, 1973), 而地表热岛通常基于卫星热红外遥感获取的地表温度实现面状监测 (Miles 和 Esau, 2020; Peng 等, 2012; Lagouarde 等, 2010)。就形成机制而言, 冠层热岛与城区和郊区冠层的热量吸收、存储和释放能力差异有关, 而地表热岛则更多地与城区和郊区植被覆盖和反照率等地表属性差异有关 (Oke 等, 2017)。对冠层热岛和地表热岛进行综合比较有助于深入理解城市气候在不同垂向空间上的特征规律, 一直以来都是城市气候领域的研究重点 (Wu 和 Ren, 2019; Anniballe 等, 2014)。

在空间维度上, 虽然卫星遥感具备全球观测能力, 但由于密集的气象站点观测数据可获得性较差, 早期研究多选取单个城市或区域范围内少数几座城市来比较冠层热岛和地表热岛之间的时空特征差异 (Sheng 等, 2017; Anniballe 等, 2014; Zhou 等, 2011)。近年来, 随着气象服务 (如数值模拟技术与地面观测网络) 不断发展, 极大地促进了全国乃至全球范围的冠层热岛和地表热岛时空差异比较研究 (Du 等, 2021, 2023), 显著增进了对城市热环境垂直结构的理解。在时间维度上, 即便地面站点观测能够获得逐时气象观测资料, 然而满足对城市内部精细监测的高空间分辨率的遥感地表温度数据 (例如 Aqua 和 Terra 提供地表温度产品) 局限于特定的卫星过境时刻, 这导致目前两类热岛的比较研究大多聚焦于日内若干典型时刻 (即卫星过境时刻) 的特征分析, 而相对较少地涉及两类热岛在日内连续时间尺度 (如日内逐时) 的特征差异比较。因此, 全面并深入地对比分析这两类热岛时空特征在日内连续 (如日内逐时) 尺度的差异, 一方面可以更好地理解城市热岛的日内演变特征 (Oke 等, 2017), 另一方面亦有助于更好地识别城市居民面临热风险的具体时间节点 (He 等, 2018)。

目前, 针对单个或少数城市, 已有研究初步分析了在日内连续尺度地表和冠层热岛之间存在的特征差异 (Stewart 等, 2021; Venter 等, 2021; Wang 等, 2017; Allen 等, 2017), 结果表明这两类热岛在时间和空间特征上都呈现显著的差异。在

时间特征方面, 地表热岛通常在日出后开始增加并于日出后约 9 h 达到日内最大, 之后开始下降且在日落时段下降速率最大 (Stewart 等, 2021)。冠层热岛日内变化特征则与地表热岛相反, 即通常在日出后开始下降并于日出后约 3 h 下降幅度最大, 下午开始增加并于日落时达到最大增幅 (Venter 等, 2021; Wang 等, 2017)。此外, 这两类热岛的日内变化特征都呈现季节性差异。无论在白天还是夜晚, 地表热岛的日内变化幅度通常在夏季更为显著, 而冠层热岛的日内变化幅度通常在冬季更为显著 (Wang 等, 2017)。在空间特征方面, 对于湿润区城市, 夏季地表热岛和冠层热岛的逐时变化曲线围绕白天峰值呈现准对称分布。而对于干旱区城市, 夏季地表热岛和冠层热岛的逐时变化速率差异较大, 日内逐时变化曲线差异更大 (Stewart 等, 2021)。

尽管在地表热岛和冠层热岛日内逐时变化特征差异方面已取得了一定进展, 但此类研究通常仅在日内少数时刻对两类热岛的时空特征差异进行了对比分析 (Venter 等, 2021), 且其所选取的研究区局限于单一或少数气候背景下的少量城市 (Stewart 等, 2021)。也就是说, 尚未在较大地理空间范围对两种热岛逐时变化特征差异展开细致分析, 这导致不同气候背景下城市冠层热岛和地表热岛日内逐时变化特征差异尚不明晰。为了完善该领域的研究, 本研究选取中国 27 个省会城市为研究对象, 利用 1544 个高密度气象站点观测得到的逐时空气温度数据, 结合 MODIS 地表温度数据与地表温度日循环 DTC (Diurnal Temperature Cycle) 模型生成的逐时遥感地表温度数据, 分析了地表热岛强度与冠层热岛强度逐时变化以及两者差值 (ΔUHI) 的时空变化特征, 并进一步比较了在不同气候区和不同城市规模下两类热岛日内逐时变化特征的差异。本研究有助于增进在精细时间尺度下对城市热岛垂向空间特征的深入认知。

2 研究区与数据

2.1 研究区

本研究选取中国 27 个省会城市 (含直辖市) 为研究对象 (表 1)。需要特别说明的是, 部分省会城市, 由于其可获得密集城市自动气象站点观测数据较少, 本研究并未包含台北、香港、澳门、

拉萨、海口、西宁和广州这7个城市。就气候区而言（郑景云 等，2010），这些城市包含了以下5类气候区：南亚热带（2个）、中亚热带（6个）、北亚热带（5个）、暖温带（8个）、中温带（6个）。基于人口数据划分城市等级（黄金川和陈守强，2015），选取的27个城市包含了以下3类城市规模：超大城市（5个，城区常住人口数量1000万以上）、特大城市（10个，城区常住人口数量500—1000万）、大城市（12个，城区常住人口数量100—500万）。

表1 研究区27个城市信息
Table 1 Details of the 27 major capital cities in China

城市名称	城市规模	气候区	城市名称	城市规模	气候区	城市名称	城市规模	气候区
北京	超大城市	暖温带	郑州	特大城市	暖温带	乌鲁木齐	大城市	中温带
天津	超大城市	暖温带	杭州	特大城市	北亚热带	银川	大城市	中温带
上海	超大城市	北亚热带	南京	特大城市	北亚热带	长春	大城市	中温带
成都	超大城市	中亚热带	武汉	特大城市	北亚热带	石家庄	大城市	暖温带
重庆	超大城市	中亚热带	昆明	特大城市	中亚热带	太原	大城市	暖温带
哈尔滨	特大城市	中温带	长沙	特大城市	中亚热带	合肥	大城市	北亚热带
沈阳	特大城市	中温带	福州	大城市	南亚热带	贵阳	大城市	中亚热带
济南	特大城市	暖温带	呼和浩特	大城市	中温带	南昌	大城市	中亚热带
西安	特大城市	暖温带	兰州	大城市	中温带	南宁	大城市	南亚热带

2.2 研究数据

本文数据主要包含气象数据、风云数据、MODIS数据以及辅助数据4部分。

气象数据（[http://data.cma.cn/\[2021-09-05\]](http://data.cma.cn/[2021-09-05])）获取自国家气象科学数据中心，主要采用1544个地面自动气象站观测的2017年—2019年的日内逐时2 m空气温度SAT（Surface Air Temperature）（杨萍 等，2011）。该空气温度数据质量良好，观测精度为0.1℃（Liu 等，2022），用于计算逐时冠层热岛强度。

MODIS数据（[https://search.earthdata.nasa.gov/\[2020-12-23\]](https://search.earthdata.nasa.gov/[2020-12-23])）包括2017年—2019年的地表温度LST（Land Surface Temperature）产品MYD11A1和MOD11A1（C6版本），以及2018年的土地覆盖类型年产品MCD12Q1。其中地表温度产品的空间分辨率为1 km，时间分辨率为4次/d，过境时间大致是在当地时间的01:30、10:30、13:30和22:30左右（Wang等，2010a，2010b）。地表温度产品的数据精度可以达到1℃以内（Li等，2021；Duan等，2019），该数据将作为DTC模型的数据源，用于计算逐时地表温度（Wan和Dozier，1996）。土地覆盖类型年产品的空间分辨率为500 m，本研究将其重采样至1 km，用于剔除水体、雪和冰川等特殊像元（Lai等，2018）。

风云数据（[http://data.nsmc.org.cn/portalsite/\[2021-10-15\]](http://data.nsmc.org.cn/portalsite/[2021-10-15])）是FY-2F卫星VISSR-II传感器提

供的2017年—2019年的逐时地表温度产品（许健民 等，2010），空间分辨率为5 km，本研究将其重采样到1 km。该数据主要用于筛选晴空站点（孟翔晨 等，2019；Jin，2000），以及验证DTC模型的精度。

辅助数据包括城市边界数据（[http://data.ess.tsinghua.edu.cn/\[2020-12-21\]](http://data.ess.tsinghua.edu.cn/[2020-12-21])）和高程数据（[http://www.ngdc.noaa.gov/\[2020-12-21\]](http://www.ngdc.noaa.gov/[2020-12-21])）。2018年城市边界数据GUB（Global Urban Boundary）是基于城市不透水层数据提取的全球城市边界数据集（Li等，2020），用于确定城区的范围。高程数据是GTOPO30数字高程模型产品，空间分辨率为30 arcsec（约1 km），用于剔除与城区高程中位数相差超过±100 m的城郊像元（Danielson和Gesch，2011）。

表2 研究所用数据信息
Table 2 Details of the data used in this study

数据类型	产品	时间分辨率	年份	空间分辨率
站点空气温度		逐时	2017—2019	
MODIS地表温度	MYD11A1	4次/d	2017—2019	1 km
	MOD11A1			
土地覆盖类型	MCD12Q1	逐年	2018	500 m
FY-2F地表温度	LST	逐时	2017—2019	5 km
城市边界	GUB	5a	2018	
高程	GTOPO30			30 arcsec

3 方法

本研究通过以下3个步骤计算和分析城市地表热岛和冠层热岛的日内逐时差异。首先,划分城郊像元和选取城郊站点;其次,量化日内逐时地表热岛强度 I_s (SUHI Intensity) 和冠层热岛强度 I_c (CUHI Intensity), 并计算两种热岛日内逐时差异 ΔUHI ;最后,分析在不同背景气候以及不同城市规模条件下 ΔUHI 的逐时变化特征。

3.1 城郊像元划分及城郊站点选取

本研究将2018年GUB数据中城市边界范围内的区域定义为城区,将城区外两倍城区面积的缓冲区定义为郊区(Debbage和Shepherd, 2015; Clinton和Gong, 2013)。根据城郊定义,首先识别了MODIS数据和风云数据的城区像元和郊区像元。然后,通过以下3个标准对城郊像元进行了进一步筛选(Quan等, 2014; Streutker, 2002): (1) 为消除像元异常值对热岛强度计算的影响,本研究去除了地表温度高于城郊平均值 3°C 的像元(Chakraborty和Lee, 2019); (2) 为避免水体等像元对地表热岛强度计算的影响,去除了土地覆盖类型为雪、和水体像元(Lai等, 2018); (3) 为减少地形对热岛强度计算的影响(Imhoff等, 2010),剔除了与城区高程中位数相差超过 $\pm 100\text{ m}$ 的像元。基于以上的城郊像元划分,将气象站点落在城区像元的站点划分为城区站点,落在郊区像元的站点划分为郊区站点(Wang等, 2017)。平均每个城市拥有35个城区站点和22个郊区站点。

3.2 晴空条件下逐时 ΔUHI 计算

(1) 晴空条件下逐时 I_s 计算。基于MODIS的4个过境时刻的月平均LST,利用准确性和稳定性较好的4参数DTC模型获取了晴空条件下月均日内逐时地表温度(Hong等, 2018)。4参数DTC模型公式如下:

$$\begin{cases} T_{\text{day}}(t) = T_0 + T_a \cos(\theta_z) \cos^{-1}(\theta_{z,\min}) \\ e^{(m_{\min} - m(\theta_z)) \times 0.01}, t < t_s \\ T_{\text{nig}}(t) = T_0 + T_a \cos(\theta_z) \cos^{-1}(\theta_{z,\min}) \\ e^{(m_{\min} - m(\theta_z)) \times 0.01} e^{\frac{-12}{\pi k}(\theta - \theta_s)}, t \geq t_s \end{cases} \quad (1)$$

式中, $T_{\text{day}}(t)$ 和 $T_{\text{nig}}(t)$ 分别是白天和夜间的地表

温度; T_0 是日出时刻的地表温度; T_a 是地表温度的变化幅值; t 是一天中的整点时刻, t_s 是地表温度开始衰减的时刻; θ 是热时角; θ_z 是太阳天顶角; θ_{zs} 是 t_s 时刻的 θ_z ; m 是表征大气状况的系数; k 是地表温度的衰减系数; θ 、 θ_z 、 m 和 k 的具体计算公式可参考(Göttsche和Olesen, 2009)。

需要说明的是,DTC模型得到日内逐时LST的时间是从日出时刻至下一个日出时刻(Lai等, 2018)。为了便于后面的对比分析,利用式(2)将DTC模型获取的月均逐时地表温度的时间转换至日内24个地方时(Duan等, 2012; Elagib等, 1999):

$$\begin{cases} \delta = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}(284 + \text{DOY})\right) \\ \omega = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \phi \times \tan \delta) \\ t_{\text{sunrise}} = 12 - \frac{\omega}{2} \\ \text{LST}(t) = T(t - t_{\text{sunrise}}), t \geq T_{\text{sunrise}} \\ \text{LST}(t) = T(t + 24 - t_{\text{sunrise}}), t < T_{\text{sunrise}} \end{cases} \quad (2)$$

式中,DOY是一年中的某天; δ 是太阳偏角; ϕ 是位置的纬度; ω 是白天的持续时间; t_{sunrise} 是日出时刻; T 是DTC模型日内时刻的地表温度序列, T_{sunrise} 表示日出时刻的地表温度;LST(t)是地方时的地表温度。

在上述月均日内逐时LST的基础上,分别对城区和郊区所有像元取平均得到城区和郊区的月均日内逐时LST。然后,通过计算两者的差值得到月平均日内逐时 I_s 。具体公式如下:

$$I_s(t) = \text{LST}_{\text{urban}}(t) - \text{LST}_{\text{rural}}(t) \quad (3)$$

式中, $\text{LST}_{\text{urban}}$ 和 $\text{LST}_{\text{rural}}$ 是城区和郊区的月均日内逐时LST; I_s 是月平均的日内逐时地表热岛强度。

(2) 晴空条件下逐时 I_c 计算。考虑到基于MODIS和DTC模型获取的是晴空条件下 I_s (Niu等, 2022),为保证 I_s 和 I_c 比较的一致性,本文基于站点气温计算了晴空条件的 I_c 。具体计算过程如下:

首先,将FY-2F数据中DN值为-2的像元判定为云遮挡像元(孟翔晨等, 2019)。其次,将云遮挡像元所在时刻判定为非晴空观测,并剔除该时刻的站点SAT观测,其余观测即为晴空条件下的SAT。最后,计算了每个气象站点月平均的晴空日内逐时SAT,进而对城区和郊区站点分别取平均得到了晴空条件下城区和郊区的月平均日内逐时

SAT。基于此，利用式（4）计算了月平均的日内逐时 I_c ：

$$I_c(t) = SAT_{urban}(t) - SAT_{rural}(t) \quad (4)$$

式中， SAT_{urban} 和 SAT_{rural} 是城区和郊区的月均日内逐时SAT； I_c 是月平均的日内逐时冠层热岛强度。

（3）晴空条件下逐时 ΔUHI 计算。基于上述步骤获取的晴空条件下月平均日内逐时的 I_s 和 I_c ，计算了月平均日内逐时 ΔUHI （式5）：

$$\Delta UHI(t) = I_s(t) - I_c(t) \quad (5)$$

式中 I_s 和 I_c 是月平均的日内逐时地表热岛强度和冠层热岛强度； ΔUHI 是月平均的日内逐时地表热岛强度和冠层热岛强度的差值。

基于月均的逐时 I_s 、 I_c 和 ΔUHI ，进一步计算了年均和四季平均的逐时 I_s 、 I_c 和 ΔUHI 。

3.3 晴空条件下逐时 ΔUHI 的分析

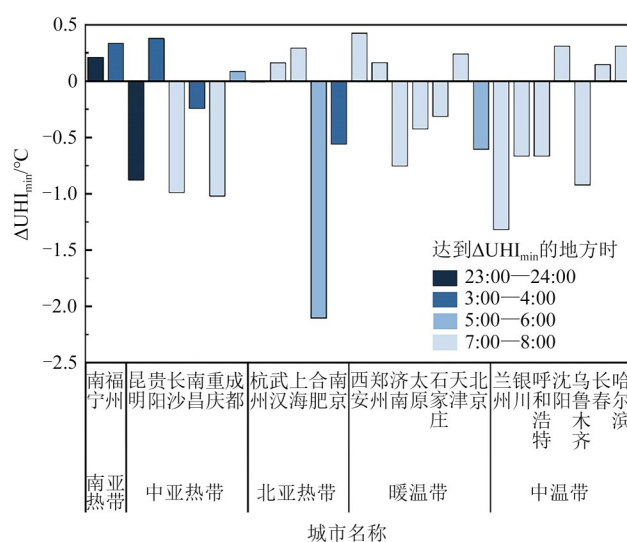
本文从全球平均、不同气候区和不同城市规模3个角度分析了 ΔUHI 的年均和季均日内逐时变化特征。采用以下6个指标定量描述不同城市 ΔUHI 的差异，包括 ΔUHI 最大值（ ΔUHI_{max} ）、最小值（ ΔUHI_{min} ）、 ΔUHI 日较差（ $\Delta UHI_{max} - \Delta UHI_{min}$ ）、 ΔUHI 到达最大值和最小值的地方时以及 $\Delta UHI > 0^\circ\text{C}$ 的持续时长。其中， ΔUHI 的最值和到达最值的地方时，可以反映出一天中两者差异的最大和最小及其时刻；日较差可以反映出两种热岛日内差异的波动情况； $\Delta UHI > 0^\circ\text{C}$ 的持续时长可以反映

出一天中 $I_s > I_c$ 的时间范围。

4 结果与分析

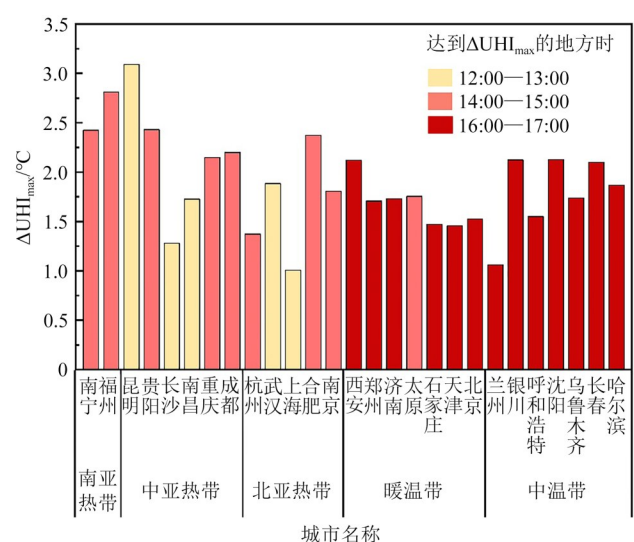
4.1 所有城市逐时 ΔUHI 的变化特征

图1展示了各城市年均 ΔUHI 的最值及达到最值的时刻、日较差和 $\Delta UHI > 0^\circ\text{C}$ 的持续时长。总体而言，不同城市之间 ΔUHI 的特征差异较大。从最值和达到最值的时刻来看，最值的空间分布规律性较差，而达到最值的时刻具有显著的南北差异。由图1（a）可见：所有城市的 ΔUHI_{min} 平均 $< 0.5^\circ\text{C}$ ，其中：西安市的 ΔUHI_{min} 最大，达到 0.4°C ；合肥市的 ΔUHI_{min} 最小，为 -2.1°C 。由图1（b）可见：所有城市的 ΔUHI_{max} 均 $> 1.0^\circ\text{C}$ ，其中：昆明市的 ΔUHI_{max} 最大，达到 3.1°C ，而上海市的 ΔUHI_{max} 最小，为 1.0°C 。由图1（a）和图1（b）可见：达到 ΔUHI_{max} 和 ΔUHI_{min} 的地方时呈现南北纬度分异规律，绝大多数南方城市达到 ΔUHI_{max} 和 ΔUHI_{min} 的地方时早于北方，早约1—4 h。由图1（c）可见：所有城市的 ΔUHI 日较差均 $> 1.0^\circ\text{C}$ ，其中：合肥市的 ΔUHI 日较差最大，达到 4.0°C ，而上海市的 ΔUHI 日较差最小，为 1.0°C 。由图1（d）可见：有48%的城市（13座） ΔUHI 在日内24个时刻都 $> 0^\circ\text{C}$ 。而乌鲁木齐、兰州、西宁等少数城市 $\Delta UHI > 0^\circ\text{C}$ 的持续时长仅9 h。



(a) ΔUHI 的最小值及其对应的地方时

(a) ΔUHI_{min} and the time when ΔUHI reaches the minimum



(b) ΔUHI 的最大值及其对应的地方时

(b) ΔUHI_{max} and the time when ΔUHI reaches the maximum

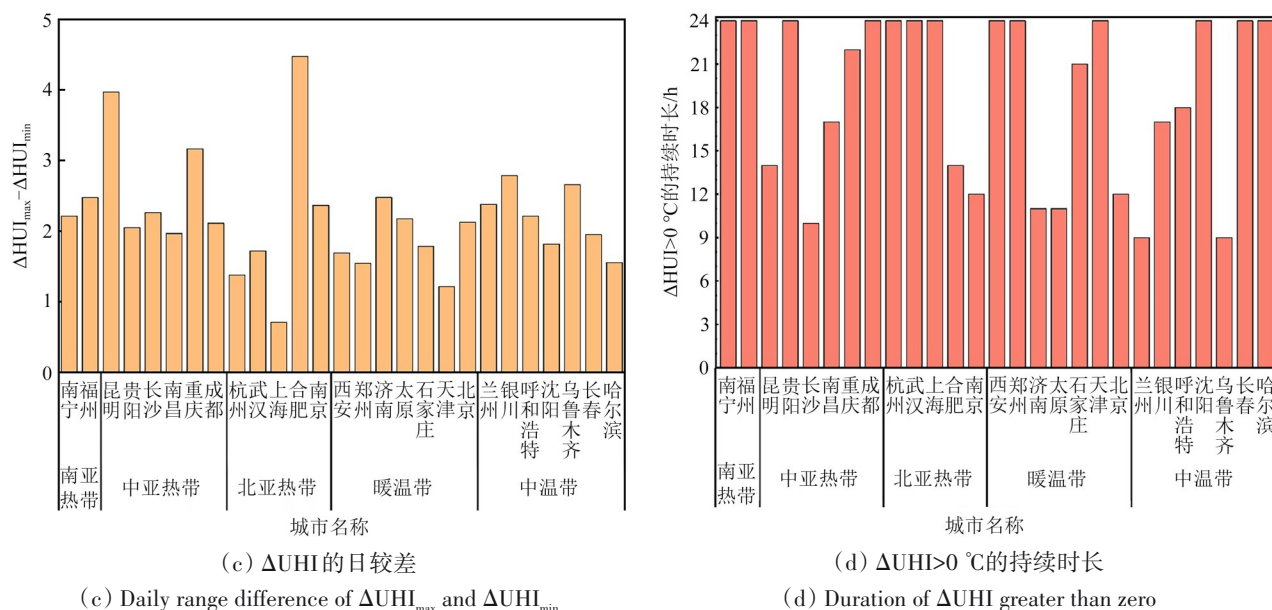


图1 各城市年均 ΔUHI 主要特征指标
Fig. 1 Main feature index of the annual ΔUHI across 27 cities

图2展示了所有城市平均的 I_s 、 I_c 和 ΔUHI 的年均和季均逐时变化情况。年均结果显示 I_s 和 I_c 呈现较大的差异。其中 I_s 曲线整体呈现山峰形态,在上午8:00达到最小值0.8 $^{\circ}\text{C}$,在下午16:00达到最大值1.9 $^{\circ}\text{C}$ 。与 I_s 相反, I_c 曲线近似山谷形态,在夜晚23:00达到最大值1.0 $^{\circ}\text{C}$,在下午14:00达到最小值0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。无论 I_s 还是 I_c ,两者在日内24个时刻都 $>0^{\circ}\text{C}$ 。对于 I_s 和 I_c 的差值 ΔUHI ,其曲线与 I_s 曲线较为类似,整体也呈现山峰形态,但 ΔUHI 日较差达到1.6 $^{\circ}\text{C}$,显著高于 I_s 的日较差(1.1 $^{\circ}\text{C}$)。日内24个时刻的 ΔUHI 都 $>0^{\circ}\text{C}$ 。在 ΔUHI 的逐时变化中,不同时间段曲线变化的影响因素不同。具体而言,在清晨6:00—8:00时, ΔUHI 存在一个小低谷,这可能是受 I_s 减少导致的。由于郊区开阔地与裸地较多,热惯性低,清晨时期对太阳辐射的响应更快,LST升温更快;而在城区由于建筑物的遮阳效应,城区地表LST升温较慢,导致城区与郊区的LST差异(即 I_s)在该时间段减小(Lai等,2018; Allen等,2017)。在上午8:00—下午16:00, ΔUHI 迅速增大,在下午16:00达到最大值1.7 $^{\circ}\text{C}$ 。这可能是因为白天 I_s 受到植被覆盖的影响更大,郊区植被的蒸散发能力和降温能力大于城区,造成 I_s 增强(Wang等,2010a,2010b)。因此,白天 I_s 显著大于 I_c ,尤其是在下午相差最大。在傍晚和夜间, ΔUHI 在日落时刻下降速度最快,在21:00—次日6:00较为接近0 $^{\circ}\text{C}$,且在凌晨2:00达到最小

值0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。这可能是因为夜间 I_s 和 I_c 差异较小,特征较一致(Sun等,2015),基本上维持着一个热平衡的状态(Wang等,2017)。

就各季节而言,所有季节 I_c 曲线都呈现山谷形态。然而, I_s 曲线在春季、夏季和秋季都呈现山峰形态,而在冬季呈现山谷形态。其中夏季 I_s 曲线数值偏大一点,且日内波动也更大。就各季节 ΔUHI 日内变化而言, ΔUHI 曲线在春季、夏季和秋季的形态基本一致,而与在冬季的形态差异较大。在春、夏、秋季, ΔUHI 曲线与年均结果均呈现山峰形态,且日内24个时刻的 ΔUHI 都 $>0^{\circ}\text{C}$ 。其中夏季白天的 ΔUHI 达到所有季节的最大值2.9 $^{\circ}\text{C}$,夜晚3个季节的 ΔUHI 差异较小,因而夏季 ΔUHI 日较差达到所有季节的最大值2.8 $^{\circ}\text{C}$ 。夏季白天 ΔUHI 更大可能是因为夏季白天太阳辐射更强,郊区植被蒸腾作用强,导致郊区降温更加明显,而城区地表不透水面占比较高,降低了蒸发蒸腾的冷却效果,使得夏季 I_s 显著增加(Wang等,2017; Sun等,2015)。再加上 I_c 在4个季节的差异相对较小,因此,夏季白天 I_s 显著大于 I_c , ΔUHI 数值达到所有季节的最大。在冬季, ΔUHI 曲线在白天先下降后上升再下降,呈现了“山谷—山峰”形态,夜间20:00至次日6:00趋于稳定且接近于0 $^{\circ}\text{C}$,上午6:00—12:00出现了 $\Delta UHI < 0^{\circ}\text{C}$ 的情况($\Delta UHI_{\max}$ 为-0.7 $^{\circ}\text{C}$), ΔUHI 日较差达到所有季节的最小值1.5 $^{\circ}\text{C}$ 。这种形态可能是因为冬季植被稀疏,导致

蒸发蒸腾的冷却效果在城市和郊区差异不明显 (Wang 等, 2020; 乔治和田光进, 2015), 使得冬季上午 I_s 整体较小, 呈现山谷形态。这种形态在中温带城市全年出现, 在暖温带和亚热带城市则出现在冬季 (Lai 等, 2018), 前人研究也记录了 I_s 在日内山谷形态的存在, 例如地中海气候城市雅典的夏季 (Sismanidis 等, 2015) 和北京市的冬季 (Zhou 等, 2013)。此外, ΔUHI 在日内达到最值的时刻存在显著的季节分异规律: 夏季最早, 在 15:00 达到最大值; 春秋稍后, 在 16:00 达到最大值; 冬季最晚, 在 17:00 达到最大值。这可能是因为除东北地区外, 不同季节 I_s 相差不大 (李宇 等, 2021), 但是较早的日出时刻会导致 I_s 在较早的时刻开始上升 (李元征 等, 2016), 所以夏季 ΔUHI 在日内达到最大值的时刻较早, 冬季则相反。

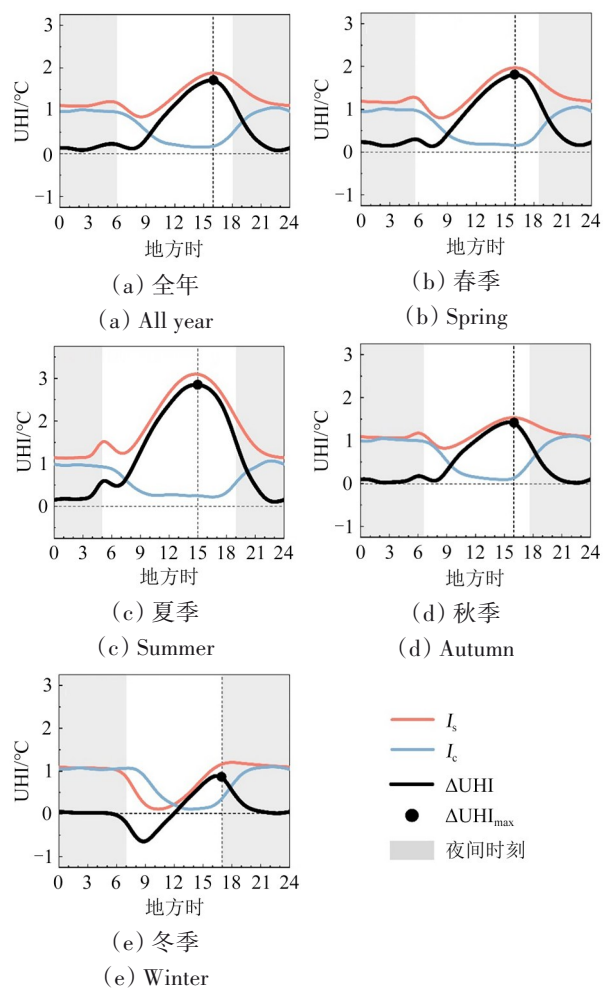


图2 各城市 I_s 、 I_c 和 ΔUHI 的年均和季均逐时变化情况
Fig. 2 Hourly variations of annual mean and seasonal mean I_s , I_c and ΔUHI across the 27 capital cities of China

4.2 不同气候区城市逐时 ΔUHI 的变化特征

图3展示了各个气候区年均和季均的逐时 ΔUHI 的变化情况。可见: 从年均结果来看, 除了南亚热带, 其他气候区的 ΔUHI 曲线形态较为一致, 与主要省会城市平均结果均呈现山峰形态。其中, 南亚热带在 5:00—9:00 抖动较大; 对于 ΔUHI 最大值和最大值时刻, 随着不同气候区积温的衰减, 城市 ΔUHI 的最大值和最小值逐渐降低, 达到最大值和最小值的时间推迟, 但 $\Delta UHI > 0^\circ\text{C}$ 的持续时长规律性不明显。如表3所示, 对于最大值和对应时间, 纬度较低的热带、中亚、北亚热带城市的逐时 ΔUHI 均在 14:00 达到最大值, 其中南亚热带城市平均 $\Delta UHI_{\max}$ 为 2.6°C , 达到了所有气候区的最大值。纬度较高的暖温带和中温带城市达到最大值的时间较迟, 为 16:00, 且这两个气候区城市平均 $\Delta UHI_{\max}$ 只能达到 1.6°C , 低于其他气候区。对于最小值和最小值对应时间, 南亚热带和中亚热带城市的逐时 ΔUHI 在夜晚 23:00 达到最小值, 而其他 3 个气候区城市的逐时 ΔUHI 在早上 5:00 或 8:00 达到最小值。只有纬度最低的热带 ΔUHI 最小值 $> 0^\circ\text{C}$, 为 0.3°C , 而其他气候区 ΔUHI 最小值均 $< 0^\circ\text{C}$, 其中中亚、北亚和暖温带城市的 ΔUHI 最小值为 -0.2°C , 纬度最高的中温带 ΔUHI 最小值最小, 为 -0.3°C 。这种纬度规律可能是因为积温越低的气候区植被覆盖越稀疏, 导致郊区植被的蒸散发能力和降温能力减弱, 造成 I_s 减少, 以至于 ΔUHI 最值降低 (Wang 等, 2010a, 2010b; Zhou 和 Wang, 2017)。对于 $\Delta UHI > 0^\circ\text{C}$ 的持续时长, 南亚热带城市的持续时间最长, 达到了 24 h。暖温带城市持续时长次之, 为 23 h, 中温带城市持续 21 h, 中亚热带和北亚热带城市持续 16 h。

在季均情况下, ΔUHI 在春季、夏季和秋季的曲线形态和全年曲线的形态基本一致, 但在冬季与其他 3 个季节相差较大。在春、夏、秋季, 所有气候区在夏季白天的 ΔUHI 数值普遍高于春秋季节, 且日内 24 个时刻均 $> 0^\circ\text{C}$ 。南亚热带和中亚热带城市的逐时 ΔUHI 显著高于其他 3 个气候区, 其中南亚热带城市的逐时 ΔUHI 在 14:00 达到所有季节的最大值 3.6°C 。在冬季, 不同气候区城市的 ΔUHI 的曲线形态区别较大, 只有南亚热带城市 ΔUHI 保持先波动上升再下降的日内变化趋势, 其他气候区城市 ΔUHI 在日出后几个小时内都出现了明显下

降。这可能是因为冬季南亚热带的热量和降水充沛，植被比其他气候区更茂盛，导致南亚热带城市的 ΔUHI 曲线并没有表现出明显的冬季特征(Wang等, 2010a)。南亚热带城市的 ΔUHI 达到所有气候区的最大值 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；中亚热带城市的 ΔUHI 达到所有气候区的最小值 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且日较差在所有气候区中最大，而北亚热带城市的 ΔUHI 曲线紧紧围绕 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 做窄幅波动，日较差最小；暖温带和中温带城市的 ΔUHI 曲线形态较接近， ΔUHI 在 $7:00-13:00 < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且在日落时刻附近达到最大值。

4.3 不同规模城市逐时 ΔUHI 的变化特征

图4展示了不同规模城市年均和季均的逐时 ΔUHI 的变化情况。随着城市规模的扩大，对应的 ΔUHI 曲线变化趋于平稳， ΔUHI 达到最大值的时刻逐渐提前，与此同时 $\Delta UHI > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时长也有所增加。

从年均结果来看，对于 ΔUHI 最大值和其出现时刻，随着城市规模的扩大， ΔUHI 最大值会逐渐降低且达到最大值的时刻会相应提前。如表4所示，大城市、特大城市和超大城市分别在 $16:00$ 、 $15:00$ 和 $14:00$ 达到最大值。相比而言， ΔUHI 最小值也随着城市规模的扩大而不断降低，而不同规模城市达到最小值的时刻均出现在 $7:00$ 。对于 $\Delta UHI > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续时长，不同规模城市之间差异较小，三者在国内24个时刻都 $> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对于 ΔUHI 日较差，城市规模越大对应的 ΔUHI 日较差越小，并且 ΔUHI 曲线波峰也越小。大城市、特大城市和超大城市对应的 ΔUHI 日较差分别是 1.8 、 1.7 和 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其中超大城市的 ΔUHI 曲线最为平稳，大城市的 ΔUHI 曲线波动范围最大。造成这种现象的原因可能是由于随着城市规模的不断扩张，城市内部更加注重城市绿化，大规模的城市绿化增强了城区的植被蒸散发能力，与此同时由于城市扩张带来的郊区地表不透水层增多的现象导致郊区的植被蒸散发能力在减弱(Sun等, 2015; 李延明等, 2004)，进而导致 ΔUHI 变化趋于平稳。

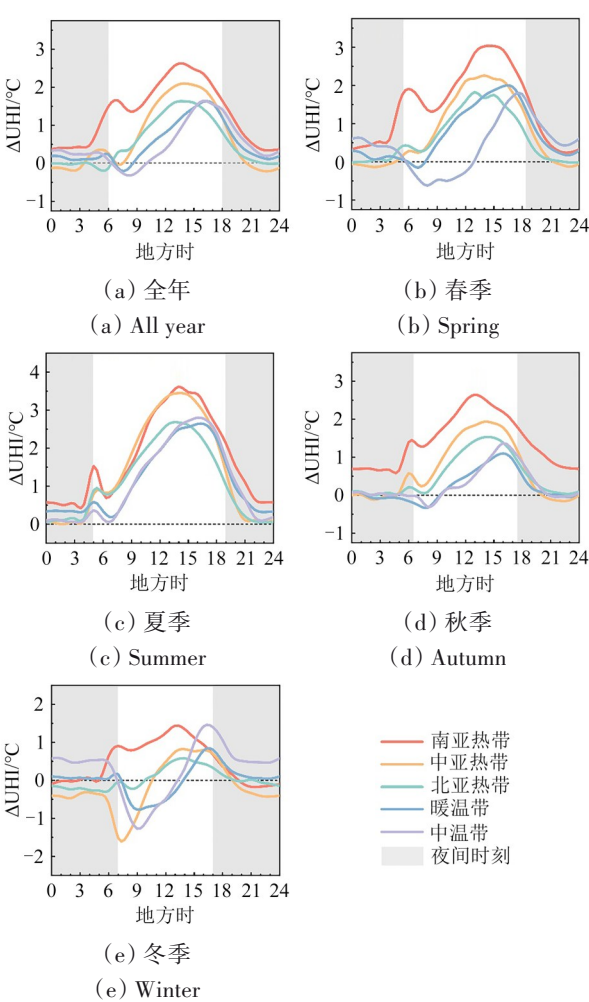


图3 不同气候区城市 ΔUHI 的年均和季均逐时变化情况
Fig. 3 Hourly variations of annual mean and seasonal mean ΔUHI across different climate zones

在季均情况下，春季、夏季和秋季的 ΔUHI 季均值曲线形态和年均值曲线的形态基本一致，但冬季的 ΔUHI 季均值曲线呈现相对较为独特的变化特征。在冬季，随着城市规模的扩大，对应的城市 ΔUHI 日较差会显著降低，大城市、特大城市和超大城市的日较差分别是 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其中超大城市的曲线变化最为平稳，大城市的曲线波动最大，其 ΔUHI 对应的最大值和最小值分别为 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表3 不同气候区城市年均逐时的 ΔUHI 指标

Table 3 Annual average of ΔUHI hourly indicators in different climate cities

城市所属气候区	$\Delta UHI_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta UHI_{\min}/^{\circ}\text{C}$	ΔUHI 日较差/ $^{\circ}\text{C}$	$\Delta UHI_{\max}$ 地方时	$\Delta UHI_{\min}$ 地方时	$\Delta UHI > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续时长/h
南亚热带	2.6	0.3	2.3	14:00	23:00	24
中亚热带	2.1	-0.2	2.3	14:00	23:00	16
北亚热带	1.6	-0.2	1.8	14:00	5:00	16
暖温带	1.6	-0.2	1.8	16:00	8:00	23
中温带	1.6	-0.3	1.9	16:00	8:00	21

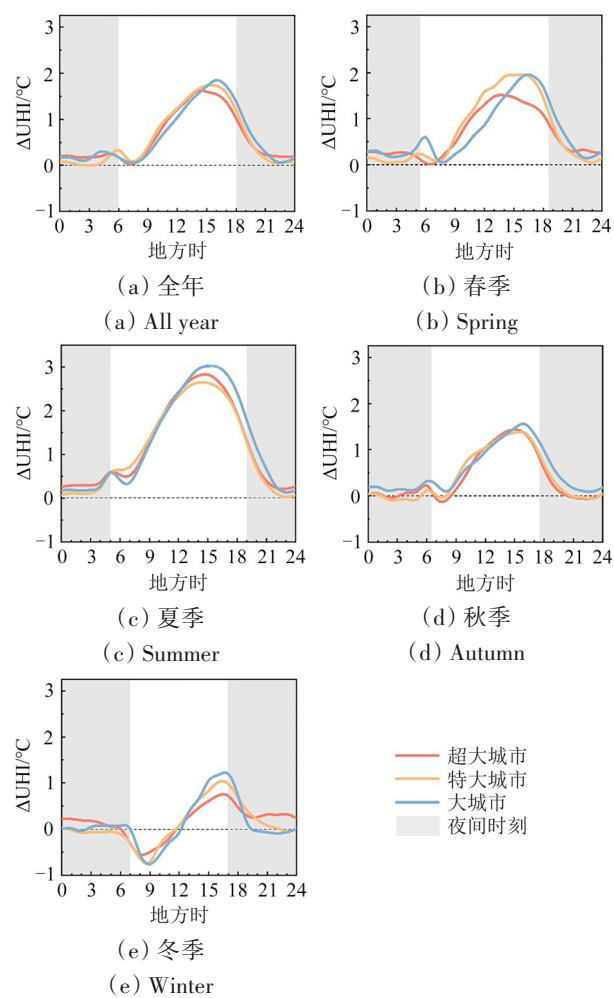


图4 不同规模城市ΔUHI的年均和季均逐时变化情况
Fig. 4 Hourly variations of annual and seasonal ΔUHI in different size cities

表4 不同规模城市年均逐时的ΔUHI指标

Table 4 Annual variations of typical ΔUHI indicators in different size cities

城市 所属 规模	ΔUHI_{max} /°C	ΔUHI_{min} /°C	ΔUHI 日较差/ °C	ΔUHI_{max} 地方时	ΔUHI_{min} 地方时	$\Delta UHI > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续 时长/h
超大 城市	1.6	0.0	1.6	14:00	7:00	24
特大 城市	1.7	0.0	1.7	15:00	3:00	24
大城市	1.8	0.0	1.8	16:00	7:00	24

5 讨 论

5.1 使用DTC模型计算 I_s 的可靠性

DTC模型被广泛用来模拟日内逐时的LST，已经有大量研究证明该模型整体精度较高（Van Den Bergh 等，2007；Göttsche 和 Olesen，2009；Duan

等，2012）。为了探究DTC模型用于计算 I_s 的可靠性，本研究对比了基于MODIS数据通过DTC模型模拟得到的主要省会城市平均 I_s 和利用FY-2F卫星LST数据计算得到的 I_s 两者之间的差异。研究表明，基于DTC模型计算的 I_s 与利用FY-2F卫星数据直接计算得到的 I_s 在白天基本保持一致，两者的差异不超过0.4 °C，且都在每天下午16:00达到最大值。而在夜间，利用FY-2F卫星数据计算得到的 I_s 会略低于基于DTC模型计算得到的 I_s ，两者的差异不超过0.8 °C，造成这种现象的原因可能是两种LST产品之间存在精度差异和空间分辨率差异（郝小鹏 等，2015）。综上，认为基于DTC模型计算得到的日内逐时 I_s 的精度是可靠的。

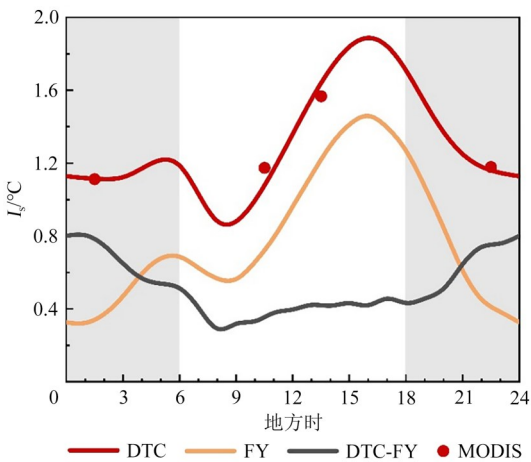


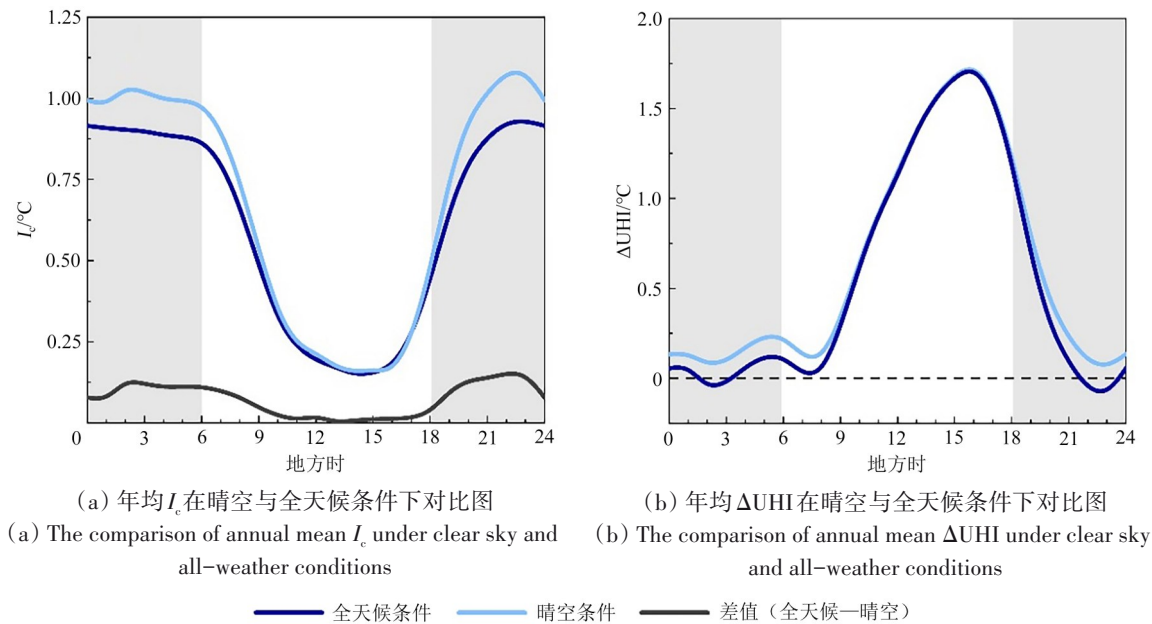
图5 基于DTC模型计算的年均 I_s 与利用FY-2F数据计算的年均 I_s 对比
Fig. 5 Comparison of annual I_s calculated by DTC model and FY-2F data (27 city average)

5.2 晴空 I_c 及全天候 I_c 差异

为了进一步辨识 I_c 在晴空与全天候条件下两者之间的差异，本研究计算了晴空与全天候条件下的日内逐时 I_c 。由图6（a）可见：晴空条件下的 I_c 在日内各个时刻均略高于全天候条件下的 I_c 。尤其是在夜晚18:00至次日6:00，晴空条件下 I_c 会比全天候条件下 I_c 大0.2 °C左右；在下午14:00—19:00，二者保持较高的一致性（差值接近于0 °C）；其余时刻，晴空条件下 I_c 会比全天候条件下 I_c 大0.1 °C左右。就日内最值而言，晴空条件下 I_c 的最大值为1.1 °C，全天候条件下 I_c 的最大值为0.9 °C，相差接近0.2 °C；晴空条件下 I_c 的最小值为0.16 °C，全天候条件下 I_c 的最小值为0.15 °C，几乎保持一致。此外，由图6（b）可见：晴空条件和全天候条件下

ΔUHI 达到最大值的时刻都在下午 16:00, 达到最小值的时刻都在凌晨 2:00。两者之间不同的是, 全天候条件下 $\Delta UHI > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续时长比晴空条件下

少 4 h, 全天候条件下 ΔUHI 日较差比晴天条件下大 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。



(a) 年均 I_c 在晴空与全天候条件下对比图
(a) The comparison of annual mean I_c under clear sky and all-weather conditions

(b) 年均 ΔUHI 在晴空与全天候条件下对比图
(b) The comparison of annual mean ΔUHI under clear sky and all-weather conditions

图 6 年均 I_c 和 ΔUHI 在晴空与全天候条件下对比图

Fig. 6 Comparison of annual mean I_c and ΔUHI under clear sky and all-weather conditions

5.3 展望

本研究较为详细地探讨了不同气候区和不同规模城市的 I_s 和 I_c 的逐时特征差异, 但仍存在以下几点不足: 首先, 本研究并未对 I_s 和 I_c 差异产生的影响因素进行深入细致探讨, 两者之间的影响因素在日内不同时刻、不同季节以及不同气候区城市之间均可能存在差异。其次, 由于一些城市的郊区气象站点较少, 故没有讨论郊区气象站点选择对 I_s 和 I_c 的影响。对于郊区参考站点而言, 基于农田站计算的夜间 I_s 和 I_c 表现出明显的季节差异, 而基于山区森林站的季节差异较小, 所以夜间 I_s 和 I_c 的季节差异在一定程度上受郊区参考站点选择的影响 (Wang 等, 2017; 王建凯 等, 2007)。最后, 本研究尚未对晴空 I_s 和全天候 I_s 进行详细对比, 探究其逐时差异。

针对上述问题, 未来拟在区域甚至全球尺度开展城市地表及冠层热岛逐时对比研究, 以获取具有更加丰富的气候背景以及人口规模的城市研究样本。在数据以及模型选取方面, 拟通过对 DTC 模型进行优化或使用具有更高时空分辨率的地表温度产品, 以期实现对研究结果的进一步细

化。除此之外, 针对 I_s 和 I_c 逐时差异的影响因素探究也是下一步研究的重点, 通过从背景气候、地表属性以及城市化进程等多个方面对影响 I_s 和 I_c 逐时差异的因素展开全面系统的探讨。

6 结论

本研究以中国主要省会城市为研究对象, 分别从全国、不同气候区和不同城市规模这 3 个空间维度探讨了冠层热岛和地表热岛差值 ΔUHI 的日内逐时变化特征, 主要结论如下:

- (1) 就全国主要省会城市年均值而言, ΔUHI 日内逐时变化曲线整体呈山峰形态, 从上午开始迅速上升并于下午 16:00 达到最大值 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 然后逐步下降, 在日落时刻下降速度最快, 并于凌晨 2:00 达到最小值 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, ΔUHI 在日内 24 个时刻均 $> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。全国主要省会城市达到 $\Delta UHI_{\max}$ 和 $\Delta UHI_{\min}$ 的时间呈现南北纬度分异规律, 绝大多数南方城市达到 $\Delta UHI_{\max}$ 和 $\Delta UHI_{\min}$ 的地方时比北方早约 1—4 h。
- (2) 就不同气候区城市而言, 从亚热带城市到中温带城市, 随着气候区纬度的升高, $\Delta UHI_{\max}$ 和 $\Delta UHI_{\min}$ 均逐渐减小, ΔUHI 达到最大值和最小值的时间均有所延迟, 且 $\Delta UHI > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续时长会降

低。(3) 就不同规模城市而言, 随着城市规模增加, ΔUHI 逐时变化曲线趋于平稳, ΔUHI 达到最大值的时刻逐渐提前, 且 $\Delta UHI > 0$ °C 的持续时间有所增加。

总体而言, 本研究全面探讨了全国主要省会城市平均水平、不同气候区划以及不同城市规模下的地表热岛强度和冠层热岛强度以及两者差值 ΔUHI 的日内逐时变化特征, 有助于促进在精细时间尺度下对城市热岛的多层次理解, 为城市制定相关热风险缓解政策提供支持。

志 谢 感谢黄帆、张先冉、缪诗祺、陈阳毅对本研究的数据搜集、方法优化和论文撰写做出的贡献, 在此表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- Allen M A, Voogt J A and Christen A. 2017. Towards a continuous climatological assessment of urban surface heat islands//2017 Joint Urban Remote Sensing Event. Dubai: IEEE: 1-4 [DOI: 10.1109/JURSE.2017.7924529]
- Anniballe R, Bonafoni S and Pichierri M. 2014. Spatial and temporal trends of the surface and air heat island over Milan using MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 150: 163-171 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.05.005]
- Chakraborty T and Lee X. 2019. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74: 269-280 [DOI: 10.1016/j.jag.2018.09.015]
- Clinton N and Gong P. 2013. MODIS detected surface urban heat islands and sinks: global locations and controls. *Remote Sensing of Environment*, 134: 294-304 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.008]
- Danielson J J and Gesch D B. 2011. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). U.S. Geological Survey
- Debbage N and Shepherd J M. 2015. The urban heat island effect and city contiguity. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54: 181-194 [DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.015.08.002]
- Du H L, Zhan W F, Liu Z H, Krayenhoff E S, Chakraborty T C, Zhao L, Jiang L, Dong P, Li L, Huang F, Wang S S and Xu Y Y. 2023. Global mapping of urban thermal anisotropy reveals substantial potential biases for remotely sensed urban climates. *Science Bulletin*, 68(16): 1809-1818 [DOI: 10.1016/j.scib.2023.06.032]
- Du H L, Zhan W F, Liu Z H, Li J F, Li L, Lai J M, Miao S Q, Huang F, Wang C G, Wang C L, Fu H Y, Jiang L, Hong F L and Jiang S D. 2021. Simultaneous investigation of surface and canopy urban heat islands over global cities. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 181: 67-83 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.09.003]
- Duan S B, Li Z L, Li H, Götsche F M, Wu H, Zhao W, Leng P, Zhang X and Coll C. 2019. Validation of collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 225: 16-29 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.020]
- Duan S B, Li Z L, Wang N, Wu H and Tang B H. 2012. Evaluation of six land-surface diurnal temperature cycle models using clear-sky in situ and satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 124: 15-25 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.04.016]
- Elagib N A, Alvi S H and Mansell M G. 1999. Day-length and extraterrestrial radiation for Sudan: a comparative study. *International Journal of Solar Energy*, 20(2): 93-109 [DOI: 10.1080/01425919908914348]
- Götsche F M and Olesen F S. 2009. Modelling the effect of optical thickness on diurnal cycles of land surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 113(11): 2306-2316 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.06.006]
- Hao X P, Song J, Sun J P, Xu M, Yuan Z D and Liu Z L. 2015. Vacuum radiance temperature national standard facility for Infrared remote sensors of Chinese Fengyun meteorological satellites. *Optics and Precision Engineering*, 23(7): 1845-1851 (郝小鹏, 宋健, 孙建平, 许敏, 原遵东, 刘曾林. 2015. 风云卫星的红外遥感亮度温度国家计量标准装置. *光学精密工程*, 23(7): 1845-1851) [DOI: 10.3788/OPE.20152307.1845]
- He B J. 2018. Potentials of meteorological characteristics and synoptic conditions to mitigate urban heat island effects. *Urban Climate*, 24: 26-33 [DOI: 10.1016/j.uclim.2018.01.004]
- Hong F L, Zhan W F, Götsche F M, Liu Z H, Zhou J, Huang F, Lai J M and Li M C. 2018. Comprehensive assessment of four-parameter diurnal land surface temperature cycle models under clear-sky. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 142: 190-204 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.06.008]
- Hu N L, Ren Z B, Dong Y L, Fu Y, Guo Y J, Mao Z X and Chang X Y. 2022. Spatio-temporal evolution of heat island effect and its driving factors in urban agglomerations of China. *Scientia Geographica Sinica*, 42(9): 1534-1545 (胡楠林, 任志彬, 董禹麟, 付尧, 郭玉洁, 毛之夏, 常馨悦. 2022. 中国城市群热岛效应时空演变及其影响因素分析. *地理科学*, 42(9): 1534-1545) [DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.09.003]
- Huang J C and Chen S Q. 2015. Classification of China's urban agglomerations. *Progress in Geography*, 34(3): 290-301 (黄金川, 陈守强. 2015. 中国城市群等级类型综合划分. *地理科学进展*, 34(3): 290-301) [DOI: 10.11820/dlkxjz.2015.03.004]
- Imhoff M L, Zhang P, Wolfe R E and Bounoua L. 2010. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 114(3): 504-513 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.10.008]
- Jiang S, Peng J, Dong J Q, Cheng X Y and Dan Y Z. 2022. Conceptual connotation and quantitative characterization of surface urban heat island effect. *Acta Geographica Sinica*, 77(9): 2249-2265 (江颂,

- 彭建, 董建权, 程雪雁, 丹宇卓. 2022. 地表城市热岛效应的概念内涵与定量刻画. 地理学报, 77(9): 2249-2265 [DOI: 10.11821/dlxb202209008]
- Jin M L. 2000. Interpolation of surface radiative temperature measured from polar orbiting satellites to a diurnal cycle: 2. Cloudy-pixel treatment. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 105(D3): 4061-4076 [DOI: 10.1029/1999JD901088]
- Kim S W and Brown R D. 2021. Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: a systematic literature review. Science of the Total Environment, 779: 146389 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146389]
- Lagouarde J P, Hénon A, Kurz B, Moreau P, Irvine M, Voogt J and Mestayer P. 2010. Modelling daytime thermal infrared directional anisotropy over Toulouse city centre. Remote Sensing of Environment, 114(1): 87-105 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.012]
- Lai J M, Zhan W F, Huang F, Voogt J, Bechtel B, Allen M, Peng S S, Hong F L, Liu Y X and Du P J. 2018. Identification of typical diurnal patterns for clear-sky climatology of surface urban heat islands. Remote Sensing of Environment, 217: 203-220 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.021]
- Li H, Du Y M, Liu Q H, Xu D Q, Cao B, Jiang J X and Wang H S. 2014. Land surface temperature retrieval from Tiangong-1 data and its applications in urban heat island effect. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 18(S1): 133-143 (历华, 杜永明, 柳钦火, 徐大琦, 曹彪, 蒋金雄, 王合顺. 2014. 天宫一号数据地表温度反演及其在城市热岛效应中的应用. 遥感学报, 18(S1): 133-143) [DOI: 10.11834/jrs.2014z20]
- Li H, Li R B, Yang Y K, Cao B, Bian Z J, Hu T, Du Y M, Sun L and Liu Q H. 2021. Temperature-based and radiance-based validation of the collection 6 MYD11 and MYD21 land surface temperature products over barren surfaces in northwestern China. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 59(2): 1794-1807 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.2998945]
- Li X C, Gong P, Zhou Y Y, Wang J, Bai Y Q, Chen B, Hu T Y, Xiao Y X, Xu B, Yang J, Liu X P, Cai W J, Huang H B, Wu T H, Wang X, Lin P, Li X, Chen J, He C Y, Li X, Yu L, Clinton N and Zhu Z L. 2020. Mapping global urban boundaries from the global artificial impervious area (GAIA) data. Environmental Research Letters, 15(9): 094044 [DOI: 10.1088/1748-9326/ab9be3]
- Li Y, Zhou D C and Yan Z M. 2021. Spatiotemporal variations in atmospheric urban heat island effects and their driving factors in 84 major Chinese cities. Environmental Science, 42(10): 5037-5045 (李宇, 周德成, 闫章美. 2021. 中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因子. 环境科学, 42(10): 5037-5045) [DOI: 10.13227/j.hjks.202102003]
- Li Y M, Zhang J H and Gu R Z. 2004. Research on the relationship between urban greening and the effect of urban heat island. Chinese Landscape Architecture, 20(1): 72-75 (李延明, 张济和, 古润泽. 2004. 北京城市绿化与热岛效应的关系研究. 中国园林, 20(1): 72-75) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-6664.2004.01.020]
- Li Y Z, Yin K, Zhou H X, Wang X L and Hu D. 2016. Progress in urban heat island monitoring by remote sensing. Progress in Geography, 35(9): 1062-1074 (李元征, 尹科, 周宏轩, 王晓琳, 胡聃. 2016. 基于遥感监测的城市热岛研究进展. 地理科学进展, 35(9): 1062-1074) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.09.002]
- Liu Z H, Lai J M, Zhan W F, Bechtel B, Voogt J, Quan J L, Hu L Q, Fu P, Huang F, Li L, Guo Z and Li J F. 2022. Urban heat islands significantly reduced by COVID-19 lockdown. Geophysical Research Letters, 49(2): e2021GL096842 [DOI: 10.1029/2021GL096842]
- Meng Q Y, Wang Z A, Zhang L L, Sun Z H, Hu D and Yang T L. 2022. Response relationship between urban thermal environment and impervious surface distribution density at multi-spatial scale: a case study of Beijing. National Remote Bulletin, 26(9): 1789-1801 (孟庆岩, 王子安, 张琳琳, 孙震辉, 胡蝶, 杨天梁. 2022. 多空间尺度下城市热环境与不透水面聚集密度响应关系. 遥感学报, 26(9): 1789-1801) [DOI: 10.11834/jrs.20210263]
- Meng X C, Liu H and Cheng J. 2019. Evaluation and characteristic research in diurnal surface temperature cycle in China using FY-2F data. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 23(4): 570-581 (孟翔晨, 刘昊, 程洁. 2019. 基于 FY-2F 数据的中国区域地表温度日变化模型评价及特征研究. 遥感学报, 23(4): 570-581) [DOI: 10.11834/jrs.20197330]
- Miles V and Esau I. 2020. Surface urban heat islands in 57 cities across different climates in northern Fennoscandia. Urban Climate, 31: 100575 [DOI: 10.1016/j.uclim.2019.100575]
- Niu L, Zhang Z F, Peng Z, Jiang Y Z, Liu M, Zhou X M and Tang R L. 2022. China's surface urban heat island drivers and its spatial heterogeneity. China Environmental Science, 42(2): 945-953 (牛陆, 张正峰, 彭中, 姜亚珍, 刘萌, 周孝明, 唐荣林. 2022. 中国地表城市热岛驱动因素及其空间异质性. 中国环境科学, 42(2): 945-953) [DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210825.004]
- Oke T R. 1973. City size and the urban heat island. Atmospheric Environment (1967), 7(8): 769-779 [DOI: 10.1016/0004-6981(73)90140-6]
- Oke T R. 1995. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects//Cermak J E, Davenport A G, Plate E J and Viegas D X, eds. Wind Climate in Cities. Dordrecht: Springer: 81-107 [DOI: 10.1007/978-94-017-3686-2_5]
- Oke T R, Mills G, Christen A and Voogt J A. 2017. Urban Climates. Cambridge: Cambridge University Press
- Peng S S, Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, Ottle C, Bréon F M, Nan H J, Zhou L M and Myneni R B. 2012. Surface urban heat island across 419 global big cities. Environmental Science and Technology, 46(2): 696-703 [DOI: 10.1021/es2030438]
- Qiao Z and Tian G J. 2015. Dynamic monitoring of the footprint and capacity for urban heat island in Beijing between 2001 and 2012 based on MODIS. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 19(3): 476-484 (乔治, 田光进. 2015. 基于 MODIS 的 2001 年—2012 年北京热岛足迹及容量动态监测. 遥感学报, 19(3): 476-484) [DOI: 10.11834/jrs.20154165]
- Quan J L, Chen Y H, Zhan W F, Wang J F, Voogt J and Wang M J.

2014. Multi-temporal trajectory of the urban heat island centroid in Beijing, China based on a Gaussian volume model. *Remote Sensing of Environment*, 149: 33-46 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.037]
- Sheng L, Tang X L, You H Y, Gu Q and Hu H. 2017. Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China. *Ecological Indicators*, 72: 738-746 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.09.009]
- Sismanidis P, Keramitsoglou I and Kiranoudis C T. 2015. Diurnal analysis of surface urban heat island using spatially enhanced satellite derived LST data//2015 Joint Urban Remote Sensing Event. Lausanne: IEEE: 1-4 [DOI: 10.1109/JURSE.2015.7120498]
- Stewart I D, Kravynhoff E S, Voogt J A, Lachapelle J A, Allen M A and Broadbent A M. 2021. Time evolution of the surface urban heat island. *Earth's Future*, 9(10): e2021EF002178 [DOI: 10.1029/2021EF002178]
- Streutker D R. 2002. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. *International Journal of Remote Sensing*, 23(13): 2595-2608 [DOI: 10.1080/01431160110115023]
- Sun H, Chen Y H and Zhan W F. 2015. Comparing surface- and canopy-layer urban heat islands over Beijing using MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 36(21): 5448-5465 [DOI: 10.1080/01431161.2015.1101504]
- Van Den Bergh F, Van Wyk M A, Van Wyk B J and Udahehuka G. 2007. A comparison of data-driven and model-driven approaches to brightness temperature diurnal cycle interpolation. *SAIEE Africa Research Journal*, 98(3): 81-86 [DOI: 10.23919/SAIEE.2007.9488131]
- Venter Z S, Chakraborty T and Lee X. 2021. Crowdsourced air temperatures contrast satellite measures of the urban heat island and its mechanisms. *Science Advances*, 7(22): eabb9569 [DOI: 10.1126/sciadv.abb9569]
- Wan Z M and Dozier J. 1996. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4): 892-905 [DOI: 10.1109/36.508406]
- Wang J K, Wang K C and Wang P C. 2007. Urban heat(or cool) island over Beijing from MODIS land surface temperature. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 11(3): 330-339 (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. *遥感学报*, 11(3): 330-339) [DOI: 10.11834/jrs.20070346]
- Wang K C, Dickinson R E, Wild M and Liang S L. 2010a. Evidence for decadal variation in global terrestrial evapotranspiration between 1982 and 2002: 1. Model development. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D20): D20112 [DOI: 10.1029/2009JD013671]
- Wang K C, Dickinson R E, Wild M and Liang S L. 2010b. Evidence for decadal variation in global terrestrial evapotranspiration between 1982 and 2002: 2. Results. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D20): D20113 [DOI: 10.1029/2010JD013847]
- Wang K C, Jiang S J, Wang J K, Zhou C L, Wang X Y and Lee X. 2017. Comparing the diurnal and seasonal variabilities of atmospheric and surface urban heat islands based on the Beijing urban meteorological network. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(4): 2131-2154 [DOI: 10.1002/2016JD025304]
- Wang W, Yao X F and Shu J. 2020. Air advection induced differences between canopy and surface heat islands. *Science of the Total Environment*, 725: 138120 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138120]
- Wu Z F and Ren Y. 2019. A bibliometric review of past trends and future prospects in urban heat island research from 1990 to 2017. *Environmental Reviews*, 27(2): 241-251 [DOI: 10.1139/er-2018-002]
- Xiao R B, Ouyang Z Y, Li W F, Zhang Z M, Gregory T, Wang X K and Miao H. 2005. A review of the eco-environmental consequences of urban heat islands. *Acta Ecologica Sinica*, 25(8): 2055-2060 (肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 张兆明, Gregory T, 王效科, 苗鸿. 2005. 城市热岛的生态环境效应. *生态学报*, 25(8): 2055-2060) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2005.08.032]
- Xu J M, Yang J, Zhang Z Q and Sun A L. 2010. Chinese meteorological satellites, achievements and applications. *Meteorological Monthly*, 36(7): 94-100 (许健民, 杨军, 张志清, 孙安来. 2010. 我国气象卫星的发展与应用. *气象*, 36(07): 94-100)
- Yang P, Liu W D, Zhong J Q and Yang J. 2011. Evaluating the quality of temperature measured at automatic weather stations in Beijing. *Journal of Applied Meteorological Science*, 22(6): 706-715 (杨萍, 刘伟东, 仲跻芹, 杨杰. 2011. 北京地区自动气象站气温观测资料的质量评估. *应用气象学报*, 22(6): 706-715) [DOI: 10.11898/1001-7313.20110608]
- Zheng J Y, Yin Y H and Li B Y. 2010. A new scheme for climate regionalization in China. *Acta Geographica Sinica*, 65(1): 3-12 (郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 2010. 中国气候区划新方案. *地理学报*, 65(1): 3-12) [DOI: 10.11821/xb201001002]
- Zhou C and Wang K C. 2017. Quantifying the sensitivity of precipitation to the long-term warming trend and interannual-decadal variation of surface air temperature over China. *Journal of Climate*, 30(10): 3687-3703 [DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0515.1]
- Zhou J, Chen Y H, Li J, Weng Q H and Yi W B. 2008. A volume model for urban heat island based on remote sensing imagery and its application: a case study in Beijing. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 12(5): 734-742 (周纪, 陈云浩, 李京, 翁齐浩, 易文斌. 2008. 基于遥感影像的城市热岛容量模型及其应用——以北京地区为例. *遥感学报*, 12(5): 734-742) [DOI: 10.11834/jrs.20080595]
- Zhou J, Chen Y H, Wang J F and Zhan W F. 2011. Maximum nighttime urban heat island (UHI) intensity simulation by integrating remotely sensed data and meteorological observations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(1): 138-146 [DOI: 10.1109/jstars.2010.2070871]
- Zhou J, Chen Y H, Zhang X and Zhan W F. 2013. Modelling the diurnal variations of urban heat islands with multi-source satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(21): 7568-7588 [DOI: 10.1080/01431161.2013.821576]

Diurnal differences between surface and canopy heat islands in major provincial capital cities of China

SU Boyang¹, ZHAN Wenfeng^{1,2}, DU Huilin¹, JIANG Sida¹, WANG Chenguang¹,
DONG Pan¹, WANG Chunli¹, LIU Zihan³

1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology/International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China;

3. School of Artificial Intelligence, Anhui University, Hefei 230601, China

Abstract: Investigations into the diurnal evolution differences between surface urban heat islands and canopy urban heat islands (termed I_s and I_c , respectively) hold great values in enhancing our comprehension of the vertical structure of urban climates at a fine time-scale. However, the hourly surface air temperature (T_a) from densely distributed weather stations within cities and the hourly land surface temperature (T_s) that possesses a relatively high spatial resolution and that can be employed for monitoring thermal conditions of urban surfaces are largely lacking. Previous studies comparing hourly I_s and I_c have mostly focused on individual cities. In this work, we utilize hourly T_a measurements from high-density meteorological stations (1544 stations) and T_s observations derived from a Diurnal Temperature Cycle (DTC) model to examine the hourly I_s and I_c and the associated hourly differences (quantified as ΔUHI , calculated by subtracting I_s from I_c) over 27 Chinese megalopolises. Furthermore, we analyze the hourly patterns of ΔUHI (e.g., maximum ΔUHI , minimum ΔUHI , and duration of $\Delta UHI > 0$) across cities with different climate backgrounds and city sizes. We obtain the following findings: (1) at the national scale, the annual mean ΔUHI remains positive throughout the diurnal cycle. The hourly ΔUHI pattern generally exhibits a peak shape, with the ΔUHI increasing from morning and reaching its maximum (1.7 °C) at around 4:00 PM. Subsequently, it gradually decreases and reaches its daily minimum (0.1 °C) at around 2:00 AM, with the most rapid decline occurring around sunset. (2) Across different climate zones, from subtropical to temperate cities, the maximum and minimum ΔUHI s follow a decreasing trend, the times at which they occur are gradually delayed, and the duration of ΔUHI greater than 0 °C gradually decreases. (3) For cities with different sizes, the variation magnitude of ΔUHI curve generally decreases and the time of minimum ΔUHI advances as city size increases. The duration of ΔUHI greater than 0 °C also increases with city size. This study can promote the understanding of the contrasting patterns between hourly differences in surface urban heat islands and canopy urban heat islands across cities with diverse background climates. The research results contribute to a deeper understanding of the vertical spatial characteristics of urban heat islands at a fine time scale.

Key words: surface urban heat island, canopy urban heat island, diurnal variation, climate zone, city size, thermal infrared remote sensing

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42201337, 42171306)