氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

中国东部季风区不同气候带城市热岛效应的差异

贾文茜 任国玉 于秀晶 张永强 张盼峰

Difference of Urban Heat Island Effect among Representative Cities of Different Climatic Zones over Eastern China Monsoon Region

JIA Wenqian REN Guoyu YU Xiujing ZHANG Yongqiang ZHANG Panfeng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20149

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

北京中央商务区(CBD)城市热岛效应的研究

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

气候与环境研究. 2018, 23(6): 633 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17036

短期大规模人口流动对上海市城市热岛效应的影响

Effects of Short-Term Massive Human Migration during the Chinese New Year on the Urban Heat Island Effect in Shanghai

气候与环境研究. 2017, 22(6): 708 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17041

年华北地区持续霾事件的特征及其环流分类研究

-

气候与环境研究. 2019, 24(3): 341 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18016

CMIP5模式对中国东部夏季不同强度降水气候态和年代际变化的模拟能力评估

Capability Assessment of CMIP5 Models in Reproducing Observed Climatology and Decadal Changes in Summer Rainfall with Different Intensities over Eastern China

气候与环境研究. 2018, 23(1): 1 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16207

中国不同区域气候条件对冬季雾日形成的差异性分析

Analysis of Variations of Winter Fog Days Formation across Different Regional Climatic Conditions in China

气候与环境研究. 2019, 24(5): 585 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18038

2000~2016年青藏高原地表反照率时空分布及动态变化

Spatial-Temporal Distribution and Variation of Land Surface Albedo over the Tibetan Plateau during 2000-2016

气候与环境研究. 2018, 23(3): 355 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17113

关注微信公众号，获得更多资讯信息

贾文茜, 任国玉, 于秀晶, 等. 2021. 中国东部季风区不同气候带城市热岛效应的差异 [J]. 气候与环境研究, 26(5): 569−582. JIA Wenqian, REN Guoyu, YU Xiujing, et al. 2021. Difference of Urban Heat Island Effect among Representative Cities of Different Climatic Zones over Eastern China Monsoon Region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (5): 569−582. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20149

中国东部季风区不同气候带城市热岛效应的差异

贾文茜[1,2] 任国玉[2,3] 于秀晶[4] 张永强[2,3] 张盼峰[5]

1 湖北省气象服务中心，武汉 430205
2 中国地质大学（武汉）大气科学系，武汉 430070
3 中国气象局气候研究开放实验室，国家气候中心，北京 100081
4 吉林省气候中心，长春 130062
5 吉林师范大学旅游与地理科学学院，吉林 136000

摘 要 选取中国东部季风区长春、北京、武汉和广州市 4 个代表性城市，利用 2012 年 9 月至 2014 年 8 月和 2016 年 1 月至 2017 年 12 月共 4 年高密度自动站气温资料，比较了南北不同纬度带城市热岛效应（Urban Heat Island, UHI）强度的时空特征。结果表明：1）长春、北京、武汉和广州市建城区年平均 UHII 分别为 0.96°C、1.06°C、0.91°C 和 0.78°C，北方城市秋、冬季多呈静稳和逆温天气，加上人为热释放量高于其他季节，UHII 明显高于春夏季；而南方城市秋季“秋高气爽”，利于热岛的发生发展，冬季和夏季 UHII 次之，且季节间差异较小；2）4 个城市热岛形成机制是一致的，均表现为夜间高于白天，清晨和午后 UHII 分别开始下降和上升；武汉市内水体较多，UHII 日内波动幅度最大，广州市四季温和，UHII 波动幅度最小；3）与南方城市比较，北方城市秋、冬季夜间高值时段长，白天低值时段短。本文揭示的南北不同气候带城市热岛强度差异，对于城市规划和城市运行管理具有实际意义。

关键词 气候带 代表城市 城市热岛强度 空间分布 时间变化
文章编号 1006-9585(2021)05-0569-14 **中图分类号** P463.3 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20149

Difference of Urban Heat Island Effect among Representative Cities of Different Climatic Zones over Eastern China Monsoon Region

JIA Wenqian[1,2], REN Guoyu[2,3], YU Xiujing[4], ZHANG Yongqiang[2,3], and ZHANG Panfeng[5]

1 *Meteorological Service Center of Hubei Province*, *Wuhan* 430205
2 *Department of Atmospheric Sciences*, *China University of Geosciences* (*Wuhan*), *Wuhan* 430070
3 *Laboratory for Climate Studies*, *National Climate Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081
4 *Jilin Climate Center*, *Changchun* 130062
5 *School of Tourism and Geographical Science*, *Jilin Normal University*, *Jilin* 136000

Abstract The spatial distribution and temporal variation of the Urban Heat Island Intensity (UHII) are analyzed by using the hourly surface air temperature (SAT) data from automatic weather stations during September 2012−August 2014 and January 2016−December 2017 over four cities, those are Changchun, Beijing, Wuhan, and Guangzhou. The annual mean UHII in built-up areas of these cities are found as 0.96°C, 1.06°C, 0.91°C, and 0.78°C, respectively. The

收稿日期 2020-12-07；**网络预出版日期** 2021-06-07
作者简介 贾文茜，女，1993 年出生，硕士研究生，助理工程师，主要研究方向为城市气候。E-mail: 1719515481@qq.com
通讯作者 任国玉，E-mail: guoyoo@cma.gov.cn
资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFA0605603，国家自然科学基金项目 41775078、41575003
Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFA0605603), National Natural Science Foundation of China (Grants 41775078 and 41575003)

UHII in northern cities is higher in spring and summer than in autumn and winter due to calm and inversion weather and higher anthropogenic heat release than in other seasons. However, the autumn UHII is the most obvious in southern cities beacause the clear sky and crisp air is conducive to the development of heat island, followed by the UHII of winter and summer, and the UHII difference among the four seasons is small. Besides, the diurnal variation of UHII in each city is characterized by a stronger UHII at night than during the day, with UHII beginning to decline (rise) in the early morning (afternoon). The amplitude of UHII diurnal variation is the largest in Wuhan due to several water bodies and the smallest in Guangzhou due to the mild climate. For the UHII diurnal variations, the steadily strong UHII period at night (day) is longer (shorter) in autumn and winter for the northern cities. The UHII difference between north and south climate zones has practical significance for urban planning and urban operations management.

Keywords Climatic zone, Representative city, Urban Heat Island Intensity, Spatial distribution, Time variation

1 引言

城市热岛效应（Urban Heat Island, UHI）是城市气候的基本特征。揭示我国不同气候带特大城市的 UHI 时空特点及其差异性，理解造成这种 UHI 地带差异的原因，不仅有助于丰富城市气候学理论，而且对于我国南北不同气候和自然功能区特大型城市未来发展规划和城市运行管理，也具有实际指导意义。

近年来，出于对地表气温变化问题的关注，对 UHI 的研究集中在单站或区域平均 UHI 强度（UHII）长期趋势上（宋艳玲和张尚印, 2003; Peterson, 2003; Weng and Yang, 2004; 于淑秋等, 2005; 陈正洪等, 2007; Ren et al., 2007, 2008; 唐国利等, 2008; 张爱英等, 2010; Bian et al., 2015; 丁硕毅等, 2015; 刘伟东等, 2016; Jia et al., 2019; Tysa et al., 2019），研究指出城市热岛效应在单个城市或区域尺度上对城市气象站气温观测趋势有显著的高估作用，且对日最低气温趋势估计的影响最为明显。Ren et al.（2008）指出 1961～2000 年间华北地区年平均气温增温率为 0.29°C/10 a，其中国家级站点的城市化增温率为 0.11°C/10 a，城市化增温贡献率达到 37.9%，大型城市城市化增温贡献率最高，达到 47.1%；张爱英等（2010）指出 1961～2004 年间，城市化引起的增温占国家站总体增温趋势的 27.33%，其中江淮区域城市化影响最大，增温贡献率达到 55.48%；Tysa et al.（2019）利用遥感数据将全国所有站点分成了受不同城市化程度影响的 6 类，发现不同城市类别站点的平均最低气温受城市化的影响最明显。此外，有关单个城市站的城市化影响研究也表明，最低气温增暖趋势高于平均气温（Ren et al., 2007; Bian et al., 2017; Jia et al., 2019）。

同时对于典型城市 UHII 气候学特征方面的研究也得到进一步重视。受区域气候条件、地理位置以及人为因素的影响，不同城市的热岛强度有不同的季节分布，我国北方城市秋冬季节热岛效应更为明显，春夏季较弱（白虎志等, 2005; 郑祚芳等, 2006; 卞韬等, 2012）。南方地区不同城市下垫面类型和地理位置不同，其 UHII 季节分布也不同。Jia et al.（2019）用武汉市 1961～2015 年国家站资料得出平均气温 UHII 夏季最强，冬季最弱，而最低气温 UHII 则在秋季最明显；邓莲堂等（2001）研究了上海城市热岛效应，指出夜间 UHII 在秋季最强，而白天 UHII 则在春季和初夏的梅雨季节相对较强，在秋季达到最低值；杨士弘等（1984）则表明广州的城市热岛效应在晚秋 11 月最强。

受自动站资料长度和密度限制，有关城市热岛强度空间分布和日内变化特征的研究仍然较少。早期工作通常仅利用某一年或者某几个月的数据分析描述 UHII 的时空特征（周淑贞和张超, 1982; 杨士弘等, 1984; 邓莲堂等, 2001; 张光智等, 2002; Kim and Baik, 2005; Chow and Roth, 2006; 李亮, 2008）。随着城市自动气象站网建设的展开，城市市区观测点逐渐增多，UHII 精细化特征的个例研究得到加强。胡文志等（2009）发现，1989～2006 年香港市日出后城郊温差迅速下降，于 10:00（当地时间）转为负值，14:00 达到最低值，夜间表现为明显的热岛效应；Tan et al.（2010）指出 2005～2007 年上海市夏季 UHII 日变化比较明显，夜间为稳定的强热岛阶段，日出后 UHII 逐渐减弱，08:00（北京时间，下同）达到最小值，随后热岛效应快速增强；Yang et al.（2013）利用 2007～2010 年自动站观测资料分析了北京市 UHII 特征，发现 21:00 至 06:00 和 11:00 至 16:00 分别为平稳的高值和低值时段，高值区出现在市区四环以内；瓦力江•瓦黑提等（2018）表明乌鲁木齐市城市热岛强度在 08:00 至

17:00 为下降时期，17:00 至 22:00 为上升时期，22:00 至次日 08:00 为稳定的强热岛阶段；孟凡超等（2020）指出天津市 UHII 在 11:00 至 16:00 和 22:00 至次日 06:00 分别为稳定的低值和高值时段阶段。

前人利用不同时间长度的气象站气温观测资料，对中国区域内不同地理位置的单个城市 UHII 特征进行了分析。研究表明，中国北方城市 90 年代后期以来年平均 UHII 基本分布在 1.0°C 以上，秋冬季和夜间的热岛强度最明显（白虎志等, 2005; 郑祚芳等, 2006; 卞韬等, 2012; 孟凡超等, 2020）；南方城市湿度大，冬季没有北方城市取暖排放人为热，UHII 总体上小于北方城市（丁硕毅等, 2015; Jia et al., 2019），且中午前后的热岛强度较强（Tan et al., 2010; 赵雪婷等, 2019），但也有研究表明南方有的城市夜间的热岛强度高于白天（邓莲堂等, 2001; 李春梅等, 2006）。城市热岛强度受背景气候、下垫面和人为热排放方式以及参考站选取方法的影响，不同的城市 UHII 在时空特征上有何具体差异，目前并没有系统研究。

高密度自动站观测网的建立以及连续的逐时气温观测资料数据，为城市热岛的时空特征研究提供了基础，有关 UHII 时空特征的研究也得到加强。但目前对于城市 UHII 的精细化特征研究还比较缺乏，且近年来有关热岛效应的研究集中在单个城市或者区域，参考站的选择方法也是不尽相同。因此利用相对客观的选站方法和同一时段的气温观测资料，分析位于不同气候带的城市 UHII 时空精细化特征差异及其原因是十分有必要的。

本文选取长春、北京、武汉、广州市为中国东部季风区南北不同气候带的代表性城市，利用 2015 年的卫星遥感土地利用数据，综合考虑了不同空间尺度上城市化对观测站气温的影响，选取乡村参考站，计算 UHII，比较分析不同气候带各城市建成区 UHII 空间分布差异及其候、日内变化特征差异。本文研究对理解城市热岛效应、探究不同城市、不同气候区的热岛形成机制以及城市气候生态研究等具有借鉴意义。

2 资料与方法

2.1 数据来源

长春、北京、武汉和广州 4 个城市均处于季风区，但纬度差异很大。北方的两个城市，长春位于东北中部，属于中温带季风气候，冬季寒冷多雪，夏季温凉湿润；北京位于华北平原北部，属于暖温带季风气候，冬季较冷少雪，夏季温热多雨。南方的两个城市，武汉位于长江中游、江汉平原，是典型的中亚热带沿江湿地型城市，冬季湿冷，夏季闷热；广州位于华南珠江三角洲，属于南亚热带季风气候，冬季短暂温湿，夏季漫长闷热。四个特大城市的地理位置，包括其所处的气候带，表示在图 1 中。

本文使用了 2012～2014 年和 2016～2017 年南北 4 个城市及其周围的自动站小时气温资料。2015 年资料缺失严重，故未采用。资料来源于中国气象局国家气象信息中心。本文还使用了中国科学院资源环境科学与数据中心（http://www.resdc.cn/ [2018-05-10]）共享的 2015 年中国土地利用资料，空间分辨率是 1 km×1 km。

2.2 质量控制

南北 4 个城市自动站气温数据质量不同，为了保证在有气温观测数据的前提下，站点数量足够多，通过筛选，得出 4 个城市站点记录数据量均较多的时间段是 2012 年 9 月至 2014 年 8 月以及 2016 年 1 月至 2017 年 12 月（共 4 年），即本文 UHII 的研究时段。本文对该时间段的资料进行了质量控制，质量控制参考前人研究（中央气象局, 2003; 杨萍等, 2011; 张志富等, 2013），包括了极值性错误数据检查，跳跃性错误数据检查，不完整记录数据处理。其中定时值缺测规定，一个月中记录缺测 7 次及以下，按实有记录做月统计但缺测 8 次或以上时，该定时不做月统计；一个月中，各定时平均值缺测 6 个或以下，日平均按实有定时平均值做月统计，若缺测 7 个或以上则相应的月平均视为缺测。

若某站点某月的数据不符合以上标准，则舍弃该站点。武汉市内自动站数量较少，因此特规定如下：除了遵循以上标准外，另外符合 48 个月内缺测率小于等于 7 个月，且每年缺测率小于等于 3 个月且不全集中在一个季度内的站点也予使用。

根据以上规定，分别对 4 个城市自动站小时气温资料做质量控制。通过质量控制的站点分布如图 2 所示。

2.3 城市站和乡村站的选择

土地利用数据（Land Use and Cover Change, LUCC）可直观反应观测站周围城市化水平和过程，目前 LUCC 数据已被广泛用于城市热岛和城市景

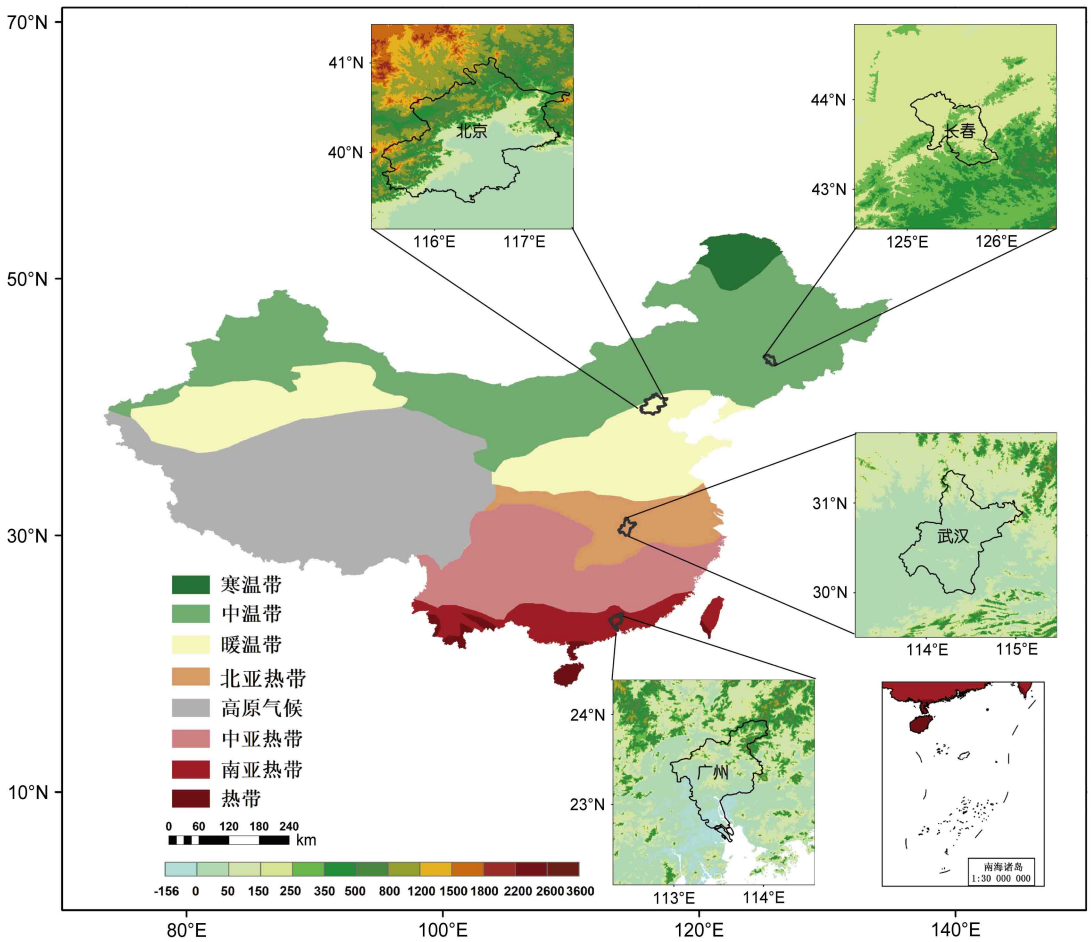

图 1 长春、北京、武汉和广州四个城市地理位置和气候特点分布

Fig. 1 Geographical location and climatic characteristics of the four cities

观格局等城市气候方面的研究中（Ren and Ren, 2011; 杨元建等, 2011; He et al., 2013）。研究表明城市化对观测站气温的影响主要来源于 3 个不同空间尺度：来自观测站附近建筑物的微尺度、来自类似公园的局地尺度、来自整个城市的中尺度影（Gallo et al., 1996; 任国玉等, 2010; Tysa et al., 2019）。本文利用 2015 年 LUCC 数据，将每个城市最大城镇用地矩形（圆形）的长边（直径）作为最大半径，以 1 km 半径为起始缓冲区，将每个站点周围不同缓冲区范围内城镇面积的比例作为筛选参考站的依据。该方法综合考虑不同空间尺度内城市化对站点气温观测的影响。具体城市站和参考站的选取步骤如下：

（1）提取 4 个城市卫星遥感反演的 2015 年土地利用资料中城镇用地数据，将每个城市市区内最大城镇用地矩形（圆形）的长边（直径）作为最大半径，记为 L；

（2）以每个自动站站点为圆心，分别做半径为 1、2、3，4、5、7、9、11,…, L km 的缓冲区，计算每个缓冲区内城镇用地面积的百分比；

（3）将 1～5 km 不同缓冲区内城镇用地面积百分比均小于 3%，且 7～L km 不同缓冲区内城镇用地面积百分比均小于 15% 的站点定为乡村站，将 1～5 km 缓冲区内城镇用地面积百分比大于 70% 的站点定为城市站。

在保证站点量足够的前提下，城市站和乡村站的遴选还要遵循以下原则：

（1）根据 2015 年土地利用资料中提取的水体用地数据，去除距岸边 1 km 范围内的站点；

（2）乡村站与城市站的平均海拔高度差值绝对值小于 30 m。

若符合以上条件，同一个方向有多个备选乡村站，考虑站点气温资料质量，站点分布均匀性以及与城市站的距离，确定最后的乡村站。4 个城市的城市站和乡村站空间分布和海拔分别如图 3 和表 1 所示。

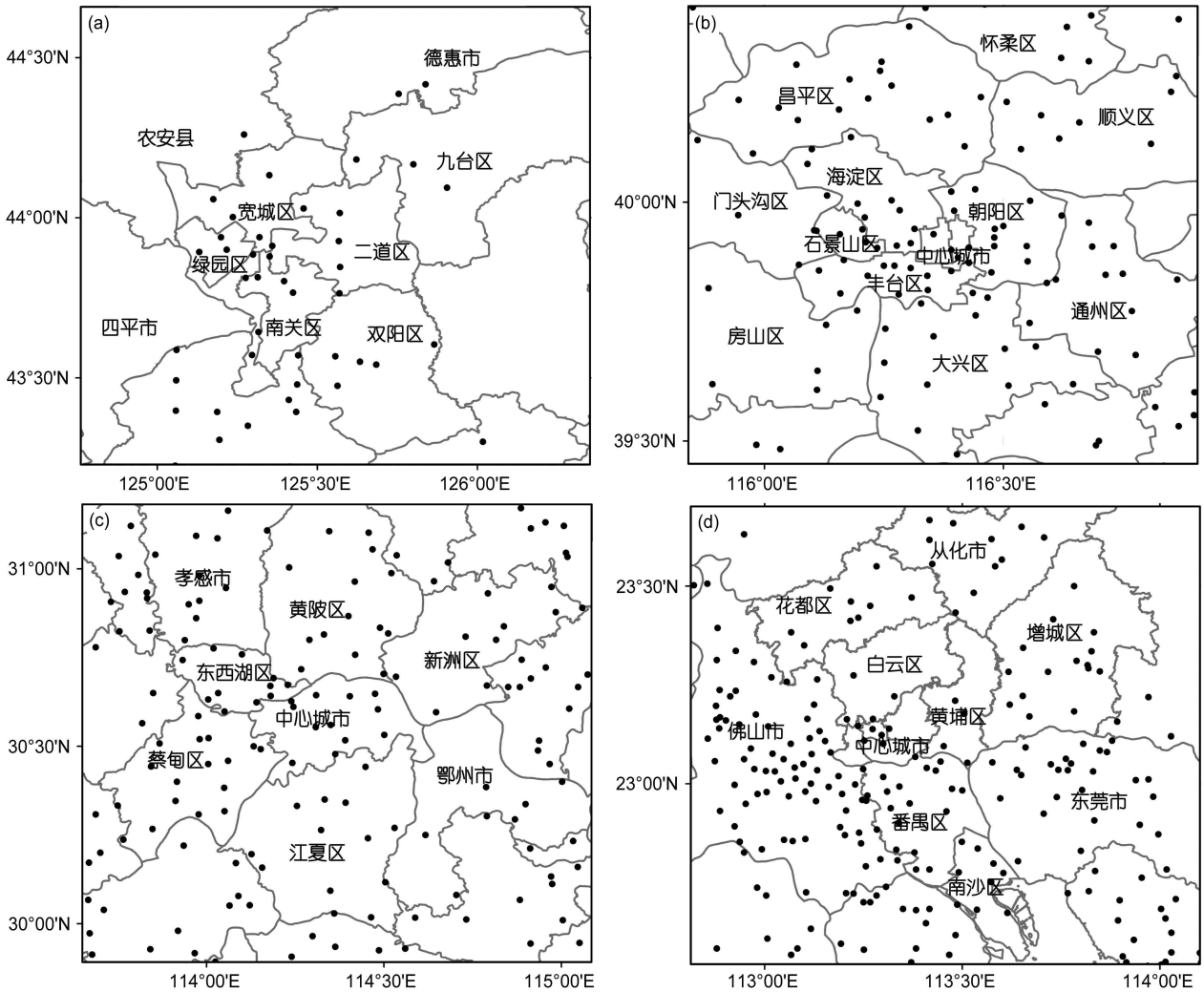

图 2　（a）长春市、（b）北京市、（c）武汉市、（d）广州市城市自动气象站分布

Fig. 2　Distributions of automatic weather stations in (a) Changchun, (b) Beijing, (c) Wuhan, and (d) Guangzhou

2.4　热岛强度的定义

城市热岛强度（Urban Heat Island Intensity, UHII）计算方法采用城乡站地面气温之差来表示（Jia et al., 2019）。

$$\mathrm{UHII} = T_i - \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} T_j, \qquad (1)$$

其中，T_i为城市站的站点气温，T_j为乡村站的站点气温。

在计算单个城市站 UHII 时，城市站气温与所有乡村站平均气温之差为该城市站的 UHII。日平均、候平均和年平均分别是 24 小时、5 天和 12 个月相应气象要素的平均值，0～6 候为 1 月，以此类推。四季划分采用气候学方法，即春季为 3～5 月，夏季为 6～8 月，秋季为 9～11 月，冬季为 12 月至次年 2 月。

分析 UHII 日内变化特征时，为了使处于不同经度的地区具有可比性，把长春、武汉和广州三地的小时数据转化为地方时，即分别在北京时间基础上调增和调减与 120°E 地方时的时差，三地与北京时差分别为+0.36、−0.38、−0.45 小时。再利用内插方法获得各地整点时刻的气温和 UHII 数值。如果没有特别说明，结果分析中的时间均指地方时。

表 1　不同城市的城市站和乡村站平均海拔

Table 1　Average elevation of urban and rural stations in different cities

城市	平均海拔/m		海拔差值/m
	乡村站（个数）	城市站（个数）	
长春市	239.7（7）	210.1（9）	−29.6
北京市	37.8（8）	45.1（39）	7.3
武汉市	43.9（7）	45.6（7）	1.7
广州市	23.2（5）	28.0（22）	4.8

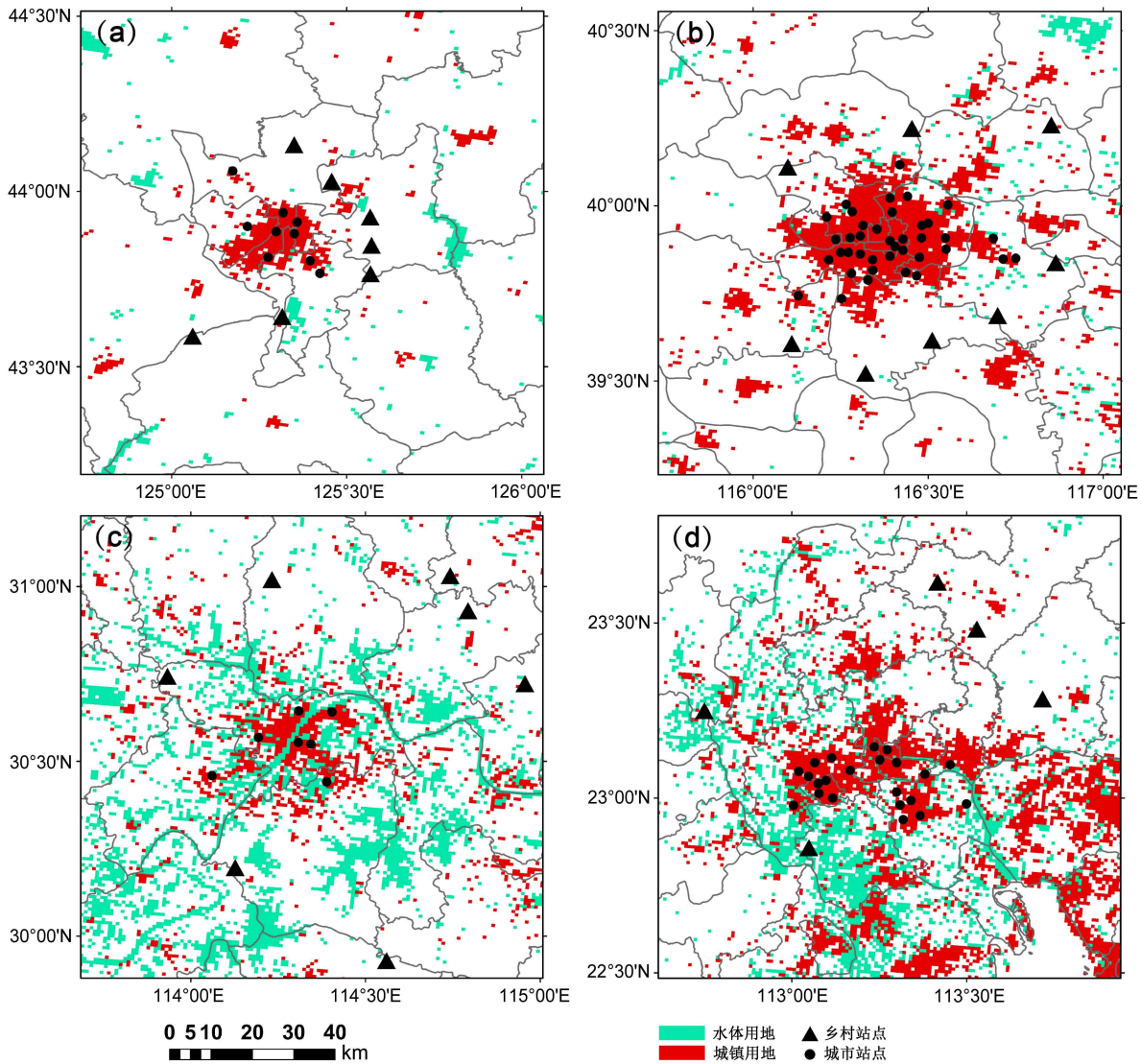

图 3 （a）长春市、（b）北京市、（c）武汉市、（d）广州市城市站及附近乡村站分布

Fig. 3 Distributions of city stations and nearby rural stations in (a) Changchun, (b) Beijing, (c) Wuhan, and (d) Guangzhou

3 结果分析

3.1 UHII 空间分布和季节变化

长春、北京和武汉 3 个城市市中心热岛效应均在 0.90°C 以上（见图 4），其中长春市中心城区的 UHII 在 0.90～1.62°C 之间，年平均最高 UHII 为 1.62°C，最高三站年平均 UHII 为 1.51°C（图 5）；北京市中心城区的年平均 UHII 分布在 0.90～2.18°C，最高值为 2.18°C，最高三站年平均 UHII 为 2.07°C；武汉市的热岛效应整体较弱，中心城区和江夏区北部年平均 UHII 介于 0.90～1.41°C，单站和最高三站 UHII 平均值分别为 1.41°C 和 1.39°C；广州市 UHII 空间分布受地势和河口水体影响，呈现“北低南高”态势，市辖区、番禺区以及接壤的佛山市为热岛高值区域，年平均 UHII 在 0.60～1.19°C 之间，最高单站和三站年平均 UHII 在 4 个城市内最小，分别为 1.19°C 和 1.18°C。

3.2 UHII 日内变化

图 6a 表明，长春、北京和武汉市年平均小时 UHII 表现的日内变化特征基本一致，均可分成 4 个阶段：两个稳定阶段（夜晚高值和白天低值）、午后到傍晚的快速上升阶段和清晨到上午的快速下降阶段。广州市 UHII 日内变化分为 3 个阶段：夜间的高值稳定阶段，清晨至午后（15:00）的缓慢下降阶段和午后（15:00）至傍晚的缓慢上升阶段。

长春市的两个 UHII 稳定阶段是 20:00 至次日 05:00 和 10:00 至 14:00，分别在 1.60°C 和 0.10°C

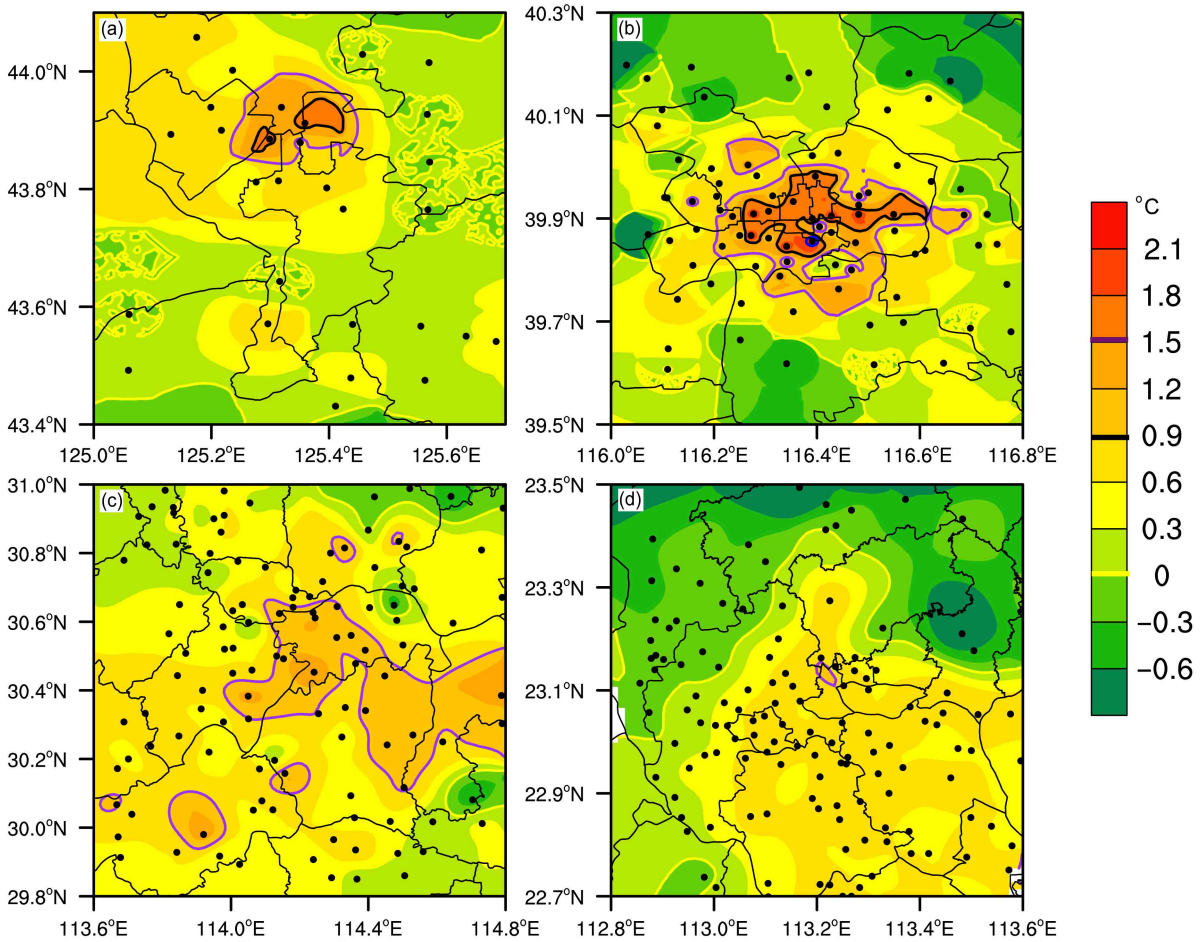

图 4　2012 年 9 月至 2014 年 8 月和 2016 年 1 月至 2017 年 12 月（a）长春市、（b）北京市、（c）武汉市、（d）广州市年平均热岛强度（Urban Heat Island Intensity, UHII）空间分布（黑色实心点代表每个城市内通过质量控制的站点）

Fig. 4　Spatial distributions of the annual average Urban Heat Island Intensity (UHII) of (a) Changchun, (b) Beijing, (c) Wuhan, and (d) Guangzhou (black dots represent the stations that pass the quality control) during Sep 2012−Aug 2014 and Jan 2016−Dec 2017

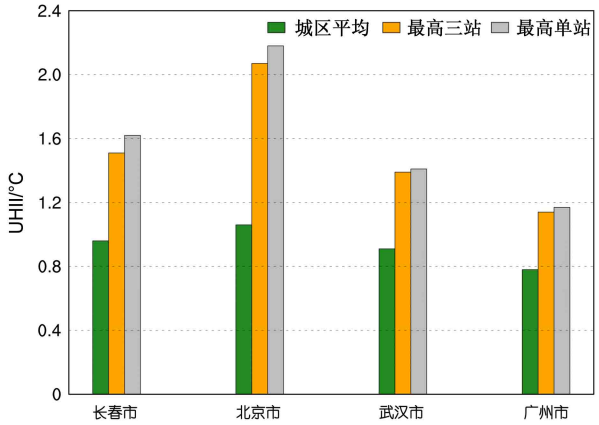

图 5　2012 年 9 月至 2014 年 8 月和 2016 年 1 月至 2017 年 12 月长春市、北京市、武汉市、广州市城区平均、最高三站平均和最高单站年平均热岛强度比较

Fig. 5　Comparisons of annual average UHII of the urban area, the highest three-station, and the highest single-station in Changchun, Beijing, Wuhan, and Guangzhou during Sep 2012−Aug 2014 and Jan 2016−Dec 2017

上下浮动，05:00 至 10:00 为下降阶段，14:00 至 20:00 为上升阶段；北京市在 21:00 至次日 06:00 和 11:00 至 16:00 为稳定高值和低值阶段，UHII 平均值分别为 1.60°C 和 0.25°C，期间为过渡阶段；武汉市的两个 UHII 稳定阶段为 22:00 至次日 06:00 和 12:00 至 15:00，平均值分别 1.48°C 和 −0.02°C；广州市 UHII 稳定高值阶段为 21:00 至次日 06:00，平均 UHII 为 1.16°C。

长春市、北京市、武汉市、广州市均表现为夜间热岛效应明显高于白天，其中除了 15:00 至 21:00 长春市 UHII 更强外，北京市 UHII 高于另外 3 个城市（图 7b）。武汉市热岛强度在正午阶段出现了较长时间（12:00 至 15:00）的零值甚至“冷岛效应”，即城市区域气温等于或小于乡村，由此导致 UHII 日内变化幅度较大。广州市夜间 21:00 至

次日 07:00 UHII 最小，10:00 至 14:00 较高，其 UHII 日内变化幅度最小。

图 7 为四个城市候平均 UHII 的年内变化情况。长春市和北京市的 UHII 均表现为秋冬季节大于春夏季节，季节变化也比较明显。长春市年平均 UHII 为 0.96°C（表 2），冬季平均 UHII 最大，达到 1.30°C，秋季次之，春季最小。冬季第 1 候即 1 月初 UHII 值最大，为 1.59°C；夏季第 32 候即 6 月初 UHII 最小，为 0.42°C（图 7a）。北京市年平均 UHII 值为 1.06°C，冬季平均 UHII 值为 1.51°C，秋季其次，夏季最小（0.71°C）。候平均最大 UHII 发生在第 72 候即 12 月末，为 1.97°C，第 40 候（7 月中旬）的热岛强度最小，为 0.38°C。

武汉、广州市的 UHII 季节变化较小，秋冬略高，春夏季稍低。武汉市年平均 UHII 为 0.91°C，秋季平均 UHII 达到 1.26°C，冬季次之，春季最小（0.74°C）。但最大（第 68 候）和最小（第 7 候）

表 2 长春市、北京市、武汉市、广州市城区年平均和季节平均热岛强度

Table 2 Comparison of the average annual and seasonal UHII of Changchun, Beijing, Wuhan, and Guangzhou

城市	热岛强度/°C				
	春季	夏季	秋季	冬季	年平均
长春市	0.71	0.88	0.93	1.30	0.96
北京市	0.90	0.71	1.13	1.51	1.06
武汉市	0.74	0.85	1.26	0.92	0.91
广州市	0.65	0.75	0.88	0.84	0.78

候平均值均出现在冬季。广州市年平均 UHII 为 0.78°C，秋季平均最高（0.88°C），冬季次之，春季最低（0.65°C）。最大候平均 UHII 发生在第 68 候（12 月初），为 1.32°C，春季第 20 候即 4 月上旬的 UHII 最小。

北方城市 UHII 年内变化幅度远大于南方城市，其中北京市冬季的热岛效应最显著（图 7b）。南

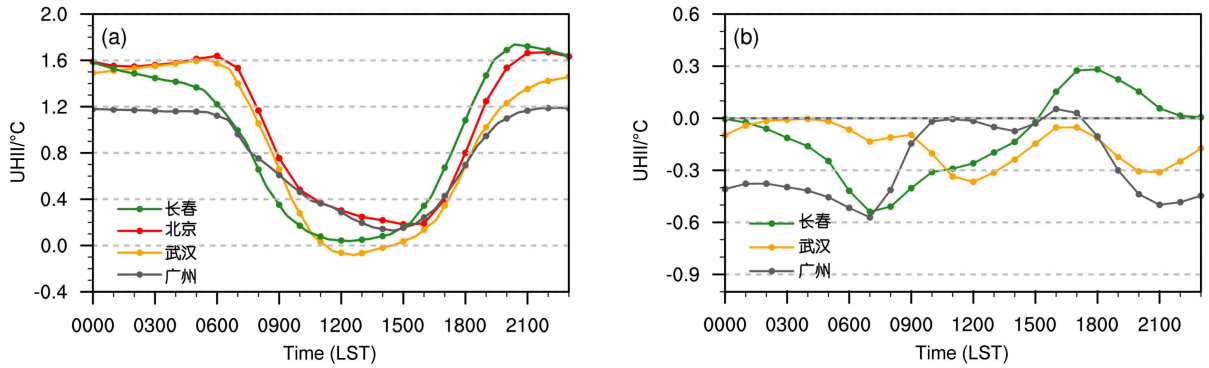

图 6 （a）长春市、北京市、武汉市、广州市 UHII 及其（b）与北京市 UHII 差值的日变化

Fig. 6 Daily variations of (a) UHII of Changchun, Beijing, Wuhan, and Guangzhou and (b) difference from Beijing UHII for Changchun, Wuhan, and Guangzhou

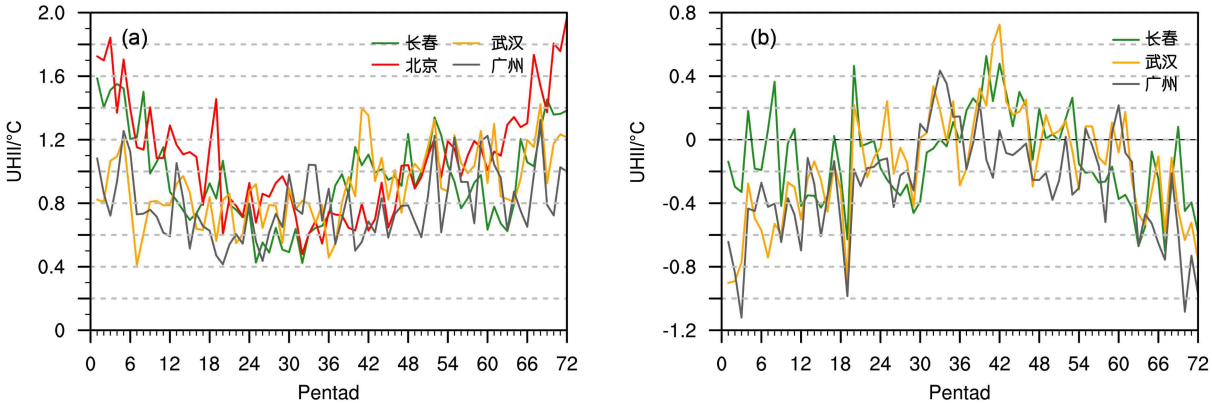

图 7 （a）长春市、北京市、武汉市、广州市候平均 UHII 及其（b）与北京市 UHII 差值的年变化

Fig. 7 Annual variations in (a) pentad average UHII of Changchun, Beijing, Wuhan, and Guangzhou and (b) the difference from Beijing UHII for Changchun, Wuhan, and Guangzhou

方城市夏季的热岛效应相对更明显，尤其是在30～36 候即初夏时段。武汉市在 36～48 候的热岛强度最强，仲夏季节 UHII 高于北京市，最高达到了 0.72°C。长春市整个夏季的 UHII 基本高于北京市。

图 8 表示我国南北方四个城市城区平均 UHII 小时—候分布剖面。北方城市热岛效应一般表现为冬、秋季夜间更强，持续时间长，春夏季较弱，持续时间短，UHII 小时—候分布图呈现“纺锤形”。长春市初秋和冬季晚上热岛强度最强，UHII 在 1.60°C 以上，晚春、初夏和晚秋夜间热岛强度较弱；白天的热岛强度明显小于夜间，其中夏季 41～42 候即 7 月下旬白天有一热岛相对高值区；晚夏和初秋白天（09:00 至 15:00）出现了－0.4～0°C 的极小值。北京市秋冬季节尤其是冬季夜间热岛效应最强，UHII 在 2.0°C 以上；春夏季夜间的热岛效应较弱；夏季 43～46 候即 8 月上中旬白天（11:00 至 15:00）出现 UHII 相对高值区，热岛强度在 0.6～0.8°C 之间；秋季和初夏白天部分时间段内 UHII 最小，甚至出现负值。

南方城市 UHII 小时—候分布图呈现“柱状”，这和晨昏界限时间季节变化小有关，季节变化和日内变化均比北方城市小。武汉市夏、秋季部分时间段夜间的热岛效应也很强，但总体上夜间高值时间段更加分散。相比北方城市，武汉市白天 UHII 更弱，秋、冬季白天 11:00 至 16:00 UHII 甚至出现负

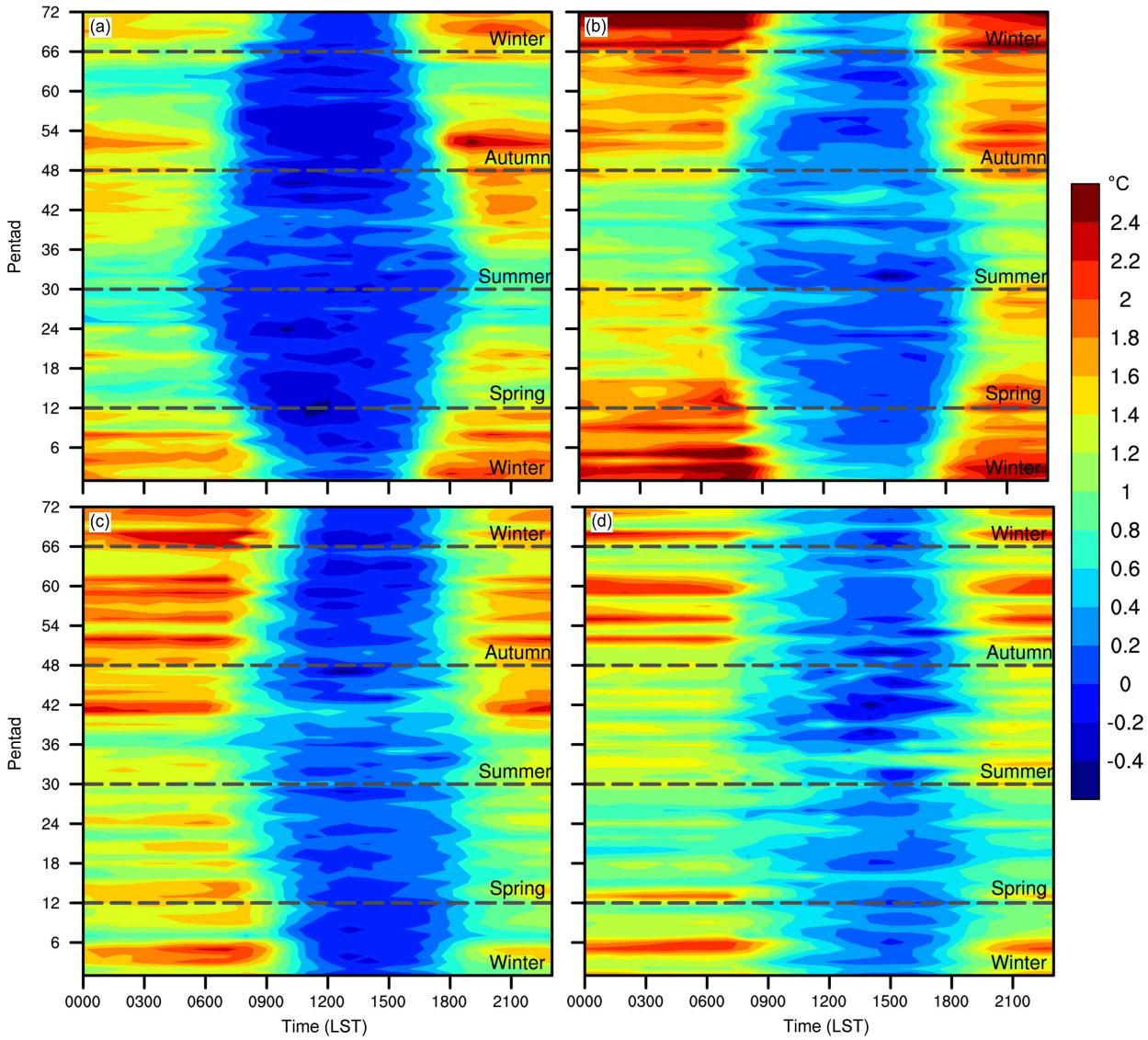

图 8　（a）长春市、（b）北京市、（c）武汉市、（d）广州市平均城市热岛强度的小时—候剖面图

Fig. 8　Hour−temporal profile of the average UHII of (a) Changchun, (b) Beijing, (c) Wuhan, and (d) Guangzhou

值。夏季 40～42 候即 7 月中下旬夜间和白天均有一 UHII 高值区。

相比其他 3 个城市，广州市秋、冬季夜间 UHII 高值时间段极少，强度也明显低于其他几个城市；但白天的热岛效应在 4 个城市中相对较强，春、秋季和冬季白天的 UHII 基本为正值，初夏 32～34 候即 6 月上中旬白天有一 UHII 为 0.8～1.0°C 的高值时间段，但夏季 40～44 候即 7 月下旬和 8 月上旬白天（12:00 至 18:00）出现了较长时间段的极低值或负值。

4 讨论

北方城市一般表现为冬季的城市热岛效应最强，其次是秋季，春季和夏季的热岛效应较弱。这与先前对北方城市热岛效应的研究结论基本一致（白虎志等, 2005; 郑祚芳等, 2006; 卞韬等, 2012）。南方城市秋季的热岛效应更强，冬季和夏季次之。其中武汉市秋季热岛效应明显高于其他 3 个季节。广州市 UHII 季节间的差异最小。对于同一城市，由于使用不同的参考站选择方法、研究时段以及气温资料，所得到的季节 UHII 排序结果也会不同。本文采用统一的方法、观测资料和研究时间段，并采用客观标准选取乡村站，因而所得结果具有可比性和可靠性。

表 3 给出了本文和前人利用站点资料对 4 个城市热岛效应季节性的分析结果。对于长春市，李亮（2008）和王宁（2016）均利用国家站气温数据，与本文利用加密的自动站小时气温资料得出的春季最小，夏季次之有所不同。造成这一差异的原因，也有可能是随着近些年夏季空调用量的加大，人为热释放增加，使得夏季城市热岛效应有所提升。对于北京市，前人得出的冬季 UHII 最强，秋季次之，夏季最小，并指出夜间 UHII 高于白天，其结论与本文完全一致。但王喜全等（2006）以天安门广场站为城市站，朝阳气象站为乡村站，得出北京市夏季 UHII 最高，冬季次之，春季最小。这和本文的结论差异很大。

武汉市热岛强度的季节分布结果与前人得出的结论亦有所不同。需要指出的是，以往研究采用的是国家基本、基准站，只选取了武汉站为城市站，结果可能受到资料非一性和偶然性等因素影响。当然，不同的分析结果也可能和选取的资料时段不同有关。广州市年平均 UHII 空间分布特征与前人研究结果基本一致（杨士弘等, 1984; 丁硕毅等, 2015），但李春梅等（2006）仅利用了 2005 年自动站气温资料，与本文的结论有所差异。

南北城市热岛效应季节上的差异来自于背景气候条件和人为热的释放方式的双重作用。北方秋冬季降水少，云量少（刘柏鑫, 2017），近地面大气逆温和静稳天气利于城市热岛现象的形成与发展，冬季取暖等引起的人为热释放量大于其他季节（王耀庭等, 2020），致使冬季 UHII 在四季中最明显；夏季人为热释放量较冬季少（王耀庭等, 2020），

表 3 长春市、北京市、武汉市、广州市季节 UHII 比较

Table 3 Comparison of seasonal UHII in Changchun, Beijing, Wuhan, and Guangzhou

城市	研究时间	UHII比较	
		本文结果	前人结果
长春市	2000~2004年	冬季>秋季>夏季>春季	冬季>秋季>春季>夏季（李亮, 2008）
	1981~2013年		冬季>秋季>春季>夏季（王宁, 2016）
北京市	2007~2010年	冬季>秋季>春季>夏季	冬季>秋季>夏季>春季（Yang et al., 2013）
	1971~2010年		冬季>秋季>春季>夏季（刘伟东等, 2013）
	2012年		冬季>秋季>春季>夏季（刘斌, 2014）
	2002年		夏季>冬季>秋季>春季（王喜全, 2006）
武汉市	1961~2010年	秋季>冬季>夏季>春季	冬季>夏季>秋季=春季（邬昀等, 2017）
	1961~2010年		冬季>夏季>秋季=春季（王苗等, 2015）
	1988~2015年		夏季>秋季>春季>冬季（Jia et al., 2019）
广州市	2005年	秋季>冬季>夏季>春季	秋季>冬季>夏季>春季（杨士弘等, 1984）
	1983年11月26~27日		秋季>冬季>夏季>春季（丁硕毅等, 2015）
	1999~2008年		春季>秋季>冬季>夏季（李春梅等, 2006）

受西南和东南气流影响，大气湿度高，云量多，城市热岛现象不易发生；春季则主要由于平均风速大（王楠等, 2019），也不利于 UHI 现象形成和发展。

南方城市秋季 UHII 最高，这可能源于秋季“秋高气爽”，少雨少云，风速偏小，同时城区内及其周围湖泊水体储存的热量造成一定程度的边界层大气增温效应，有利于增强城市热岛效应；南方城市冬季 UHII 并不明显，这是由于冬季人为热释放远小于北方城市（Yang et al., 2014），而相对湿度高于北方，云量多（刘柏鑫, 2017），不存在北方城市明显的逆温现象，热量输送和消散更加容易，可能是这个季节 UHII 相对较低的主要因素。

武汉仲夏季节受副热带高压控制，云量少，晴天多（贺懿华等, 2007），大气层结相对稳定，加之近十几年来夏季空调使用越来越普遍，人为热释放量偏大，季节平均 UHII 相对比较高。广州春季和夏季降水量较多，相对湿度大，阴天日数多（高亭亭等, 2012），一方面不利于地面接受太阳短波辐射，另一方面云和水汽也减弱了乡村地面有效辐射，夜晚乡村降温缓慢，使得城乡温差不容易增加，因此广州市春夏季 UHII 普遍偏弱。

长春、北京、武汉和广州四个城市 UHII 空间分布和日内变化具有一致性，均表现为城市中心和夜间的热岛效应更强，这取决于城市热岛效应的形成机制（周淑贞和束炯, 1994）。对于 UHII 日变化来说，北方城市夜间 UHII 整体高于南方城市，冬季表现更为明显。除了北方冬季背景气候和人为热的释放更有利于形成强热岛效应外，地表温度也通过感热和潜热影响着气温（赵雪婷等, 2019）。南北方城市下垫面性质一致，城市内波文比均比乡村大，白天热量更多的以感热方式加热周围大气；北方冬季乡村土壤湿度低于南方地区（刘荣华等, 2017），夜间感热放热较强，乡村气温降低得比南方快（图略），有助于北方夜间城乡气温差增大。

4 个城市夏季白天均有一个高值时间段，原因可能和夏季白天空调用量大、能耗高有关（李兆坚和江亿, 2009; 王耀庭等, 2020）。4 个城市中广州市白天 UHII 整体相对较高，除了人为热释放因素外，这可能也由于南方乡村土壤含水量高于北方乡村，比热容大，白天乡村近地面气温升温更慢，城乡气温差更大。此外，与其他 3 个城市不同，武汉市中午和午后 UHII 最低、凌晨和清早 UHII 偏高，这可能和武汉市内水体较多有关。武汉市内有大小湖泊近 100 个，城市内较多的水体在白天吸收和储存更多的热量，对周围环境起到降温作用，夜间周围环境降温，水体放出白天储存的热量，从而对周围环境起到升温作用。

长春市夏季早晨 UHII 快速减弱开始时间（05:00）早于其他城市，傍晚快速增强时间（19:00）晚于其他城市，冬季则相反；这使得长春 UHII 在日—年变化剖面图上呈现的哑铃形状愈发清晰，主要原因是长春市位于 44°N，在 4 个城市中纬度最高，夏半年日出时间较早、日落时间推迟，冬半年则相反，致使昼夜 UHII 强弱转换时间的季节差异较大。

通过分析对比南北城市热岛强度的不同时空尺度上的变化，可以发现，城市规模大小、发展程度和区域背景气候条件是 UHII 的决定性因素。植被覆盖、土壤湿度情况和人为热的释放时间和方式则是影响南北城市 UHII 季节性和日内变化差异的主要原因。

本文对中国东部季风区南北城市热岛强度的气候学特征差异进行了比较分析，并获得了一些初步结果。但本研究也存在一些局限性。主要包括：武汉市内自动站数量较少，气温观测质量较差，在质量控制方面不够严格。受自动站数量和数据质量影响，除北京市外，其他 3 个城市乡村站的选取存在一定困难，所选的站点数量和方位条件约束受限；其次本文只分析了南北城市 UHII 的时空特征，对于不同气候带城市在不同的天空状况、风力等级、环流形势等天气类型条件下热岛强度有何具体的差异并未涉及；最后，本文参考前人的研究结果，仅定性分析了南北各城市内 UHII 季节、日内分布差异的原因，并未进行定量对比分析，且引起南北 UHII 差异的因子及其贡献程度本文也并未进行深入探讨。所有这些，均有待今后开展进一步研究。

5 结论

本文利用高密度自动站小时观测资料，选择我国东部季风区地跨中温带、暖温带、中亚热带和南亚热带 4 个代表性城市（长春、北京、武汉和广州市），分析比较不同气候带城市 UHI 的气候学特征差异。主要结论如下：

（1）北方城市热岛强度较大，冬季低层大气多逆温和静稳天气，利于热岛的发生发展。长春市

年平均 UHII 为 0.96°C，冬季最强，为 1.30°C，秋季次之，春季最小；北京市年平均 UHII 为 1.06°C，冬季最强，达到 1.51°C，秋季次之，夏季最小。

（2）南方城市 UHII 相对较弱，秋季少雨少云，UHII 高于其他季节。武汉市年平均 UHII 为 0.91°C，秋季最高为 1.26°C，冬季和夏季次之；广州市 UHII 在 4 个城市中最小，年平均 UHII 为 0.78°C，秋季为 0.88°C，冬季次之，夏季最小，UHII 季节间差异也最小。

（3）南北城市热岛效应均表现为夜间 UHII 高于白天，其中北方秋冬季夜间高值时段长，白天低值时段短；南方城市武汉市内水体较多，白天 UHII 负值时间段最长，日内变化幅度最大；广州市四季温和，UHII 日内变化幅度在四个城市中最小。

本文表明的我国南北不同气候带城市热岛强度的时空差异，对于城市管理部门因地制宜、因时制宜、科学规划和调控城市环境、能源消费、水热供应，具有一定参考价值。

参考文献（References）

白虎志, 任国玉, 方锋. 2005. 兰州城市热岛效应特征及其影响因子研究 [J]. 气象科技, 33(6): 492−495, 500. Bai Huzhi, Ren Guoyu, Fang Feng. 2005. Characteristics of urban heat island effect and its influencing factors in Lanzhou [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 33(6): 492−495, 500. doi:10.19517/j.1671-6345.2005.06.003

卞韬, 任国玉, 张翠华, 等. 2012. 石家庄气象站记录的城市热岛效应及其趋势变化 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 4(5): 402−408. Bian Tao, Ren Guoyu, Zhang Cuihua, et al. 2012. Characteristics and change of urban heat island intensity in Shijiazhuang [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition) (in Chinese), 4(5): 402−408. doi:10.13878/j.cnki.jnuist.2012.05.002

Bian T, Ren G Y, Zhang B X, et al. 2015. Urbanization effect on long-term trends of extreme temperature indices at Shijiazhuang station, North China [J]. Theor. Appl. Climatol., 119(3 –4): 407−418. doi:10.1007/s00704-014-1127-x

Bian T, Ren G Y, Yue Y X. 2017. Effect of urbanization on land-surface temperature at an urban climate station in North China [J]. Boundary–Layer Meteorol., 165(3): 553−567.

陈正洪, 王海军, 任国玉. 2007. 武汉市城市热岛强度非对称性变化 [J]. 气候变化研究进展, 3(5): 282−286. Chen Zhenghong, Wang Haijun, Ren Guoyu. 2007. Asymmetrical change of urban heat island intensity in Wuhan [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3(5): 282−286. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.05.007

Chow W T L, Roth M. 2006. Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore [J]. Int. J. Climatol., 26(15): 2243−2260. doi:10.1002/joc.1364

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 Liantang, Shu Jiong, Li Zhaoyi. 2001. Character analysis of Shanghai urban heat island [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 17(3): 273−280. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2001.03.010

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 Shuoyi, Qiao Guanjin, Guo Yuanyuan, et al. 2015. Study on the urban heat islands and meteorological elements over the Pearl River Delta [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 31(5): 681−690. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2015.05.011

Gallo K P, Easterling D R, Peterson T C. 1996. The influence of land use/land cover on climatological values of the diurnal temperature range [J]. J. Climate, 9(11): 2941−2944. doi:10.1175/1520-0442(1996)009<2941:TIOLUC>2.0.CO;2

高亭亭, 梁卫, 罗聪, 等. 2012. 广州前汛期暴雨气候特征分析 [J]. 广东气象, 34(2): 1−4, 9. Gao Tingting, Liang Wei, Luo Cong, et al. 2012. Climate features of torrential rain in the first flood season of Guangzhou [J]. Guangdong Meteorology (in Chinese), 34(2): 1−4, 9. doi:10.3969/j.issn.1007-6190.2012.02.001

贺懿华, 谌伟, 李才媛, 等. 2007. 武汉市盛夏高温气候特征和成因及预报 [J]. 气象科技, 35(6): 809−813. He Yihua, Chen Wei, Li Caiyuan, et al. 2007. Climatic characteristics, causes and prediction of mid-summer high-temperature in Wuhan [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 35(6): 809−813. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2007.06.009

He Y T, Jia G S, Hu Y H, et al. 2013. Detecting urban warming signals in climate records [J]. Adv. Atmos. Sci., 30(4): 1143−1153. doi:10.1007/s00376-012-2135-3

胡文志, 梁延刚, 雷惠雯, 等. 2009. 香港城市与郊区气候差异分析 [J]. 气象, 35(2): 71−79. Hu Wenzhi, Liang Yangang, Lei Huiwen, et al. 2009. A study on the difference between urban and rural climate in Hong Kong [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35(2): 71−79. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2009.2.011

Jia W Q, Ren G Y, Suonan K Z, et al. 2019. Urban Heat Island effect and its contribution to observed temperature increase at Wuhan Station, Central China [J]. J. Trop. Meteor., 25(1): 102−113. doi:10.16555/j.1006-8775.2019.01.010

Kim Y H, Baik J J. 2005. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 44(5): 591−605. doi:10.1175/JAM2226.1

李亮. 2008. 长春市热岛效应的时空规律及其形成机制 [D]. 东北师范大学硕士学位论文, 33pp. Li Liang. 2008. Spatial−temporal distribution and causes of urban heat island in Changchun [D]. M. S. thesis (in Chinese), Northeast Normal University, 33pp.

李兆坚, 江亿. 2009. 我国城镇住宅夏季空调能耗状况分析 [J]. 暖通空调, 39(5): 82−88. Li Zhaojian, Jiang Yi. 2009. Analysis on cooling energy consumption of residential buildings in China's urban areas [J]. Heating Ventilating and Air Conditioning (in Chinese), 39(5): 82−88. doi:10.3969/j.issn.1002-8501.2009.05.019

李春梅, 陈新光, 唐力生, 等. 2006. 广州市 2005 年热岛强度变化特

征 [J]. 广东气象, (4): 30−33. Li Chunmei, Chen Xinguang, Tang Lisheng, et al. 2006. Characteristics of urban heat-island intensity of Guangzhou in 2005 [J]. Guangdong Meteorology (in Chinese), (4): 30−33. doi:10.3969/j.issn.1007-6190.2006.04.007

刘斌. 2014. 北京市热岛时空分布特征及影响因素分析 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 35pp. Liu Bin. 2014. Temporal and spatial distribution characteristics and factor analysis of Beijing heat island [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 35pp.

刘柏鑫. 2017. 我国云量时空变化特征及其与东亚副热带夏季风北边缘异常的关系 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 63pp. Liu Boxin. 2017. Spatial and temperature variation characteristics of cloud amount in China and its relation with the anomalies of North boundary of East Asian subtropical summer monsoon [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 63pp.

刘伟东, 杨萍, 尤焕苓, 等. 2013. 北京地区热岛效应及日较差特征 [J]. 气候与环境研究, 18(2): 171−177. Liu Weidong, Yang Ping, You Huanling, et al. 2013. Heat island effect and diurnal temperature range in Beijing area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18(2): 171−177. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11147

刘伟东, 尤焕苓, 孙丹. 2016. 1971~2010 年京津冀大城市热岛效应多时间尺度分析 [J]. 气象, 42(5): 598−606. Liu Weidong, You Huanling, Sun Dan. 2016. Multi-time scale analysis of megacities heat island effect in Beijing–Tianjin–Hebei region from 1971 to 2010 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(5): 598−606. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.05.009

刘荣华, 张珂, 晁丽君, 等. 2017. 基于多源卫星观测的中国土壤湿度时空特征分析 [J]. 水科学进展, 28(4): 479−487. Liu Ronghua, Zhang Ke, Chao Lijun, et al. 2017. Analysis of spatiotemporal characteristics of surface soil moistureacross China based on multi-satellite observations [J]. Advances in Water Science (in Chinese), 28(4): 479−487. doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2017.04.001

孟凡超, 黄鹤, 郭军, 等. 2020. 天津城市热岛强度的精细化时空分布特征研究 [J]. 生态环境学报, 29(9): 1822−1829. Meng Fanchao, Huang He, Guo Jun, et al. 2020. Analysis of fine-scale spatial and temporal characteristics of Tianjin urban heat island intensity [J]. Ecology and Environment Sciences (in Chinese), 29(9): 1822−1829. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.09.014

Peterson T C. 2003. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found [J]. J. Climate, 16(18): 2941−2959. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<2941:AOUVRI>2.0.CO;2

Ren Y Y, Ren G Y. 2011. A remote-sensing method of selecting reference stations for evaluating urbanization effect on surface air temperature trends [J]. J. Climate, 24(13): 3179−3189. doi:10.1175/2010JCLI3658.1

Ren G Y, Chu Z Y, Chen Z H, et al. 2007. Implications of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations [J]. Geophys. Res. Lett., 34(5): L05711. doi:10.1029/2006GL027927

Ren G Y, Zhou Y Q, Chu Z Y, et al. 2008. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China [J]. J. Climate, 21(6): 1333−1348. doi:10.1175/2007JCLI1348.1

任国玉, 张爱英, 初子莹, 等. 2010. 我国地面气温参考站点遴选的依据、原则和方法 [J]. 气象科技, 38(1): 78−85. Ren Guoyu, Zhang Aiying, Chu Ziying, et al. 2010. Principles and procedures for selecting reference surface air temperature stations in China [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 38(1): 78−85. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2010.01.015

宋艳玲, 张尚印. 2003. 北京市近 40 年城市热岛效应研究 [J]. 中国生态农业学报, 11(4): 126−129. Song Yanling, Zhang Shangyin. 2003. The study on heat island effect in Beijing during last 40 years [J]. Chinese Journal of Eco –Agriculture (in Chinese), 11(4): 126−129.

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. Biometeorol., 54(1): 75−84. doi:10.1007/s00484-009-0256-x

唐国利, 任国玉, 周江兴. 2008. 西南地区城市热岛强度变化对地面气温序列影响 [J]. 应用气象学报, 19(6): 722−730. Tang Guoli, Ren Guoyu, Zhou Jiangxing. 2008. Change of urban heat island intensity and its effect on surface mean air temperature records in Southwest China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 19(6): 722−730. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2008.06.012

Tysa S K, Ren G Y, Qin Y, et al. 2019. Urbanization effect in regional temperature series based on a remote sensing classification scheme of stations [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 124(20): 10646−10661. doi:10.1029/2019JD030948

瓦力江•瓦黑提, 任国玉, 孙秀宝. 2018. 乌鲁木齐城市热岛强度的日变化和季节特征 [J]. 沙漠与绿洲气象, 12(1): 21−28. Walijiang •Waheiti, Ren Guoyu, Sun Xiubao. 2018. The daily temperature characteristics of the intensity of urban heat island in Urumqi and seasonal changes [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 12(1): 21−28. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2018.01.004

王宁. 2016. 长春市城市热岛效应特征分析 [J]. 农业与技术, 36(15): 116−117. Wang Ning. 2016. Characteristics of urban heat island effect in Changchun city [J]. Agriculture and Technology (in Chinese), 36(15): 116−117. doi:10.11974/nyyjs.20160832053

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

王苗, 邬昀, 任永建, 等. 2015. 武汉地区城市热岛效应及影响要素分析 [C]//第 32 届中国气象学会年会 S6 应对气候变化、低碳发展与生态文明建设. 天津: 中国气象学会, 15pp. Wang Miao, Wu Yun, Ren Yongjian, et al. 2015. An analysis of the features of the urban heat island in Wuhan and the influence elements [C]//The 32th Annual Meeting of China Meteorological Society S6 coping with climate change, low-carbon development and construction of ecological civilization (in Chinese). Tianjin: Chinese Meteorological Society, 15pp.

王楠, 游庆龙, 刘菊菊. 2019. 1979~2014 年中国地面风速的长期变化趋势 [J]. 自然资源学报, 34(7): 1531−1542. Wang Nan, You

Qinglong, Liu Juju. 2019. The long-term trend of surface wind speed in China from 1979 to 2014 [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 34(7): 1531−1542. doi:10.31497/zrzyxb.20190715

王耀庭, 孟春雷, 苗世光, 等. 2020. 基于人口和能耗数据估算北京人为热排放 [J]. 干旱气象, 38(1): 89−99. Wang Yaoting, Meng Chunlei, Miao Shiguang, et al. 2020. Estimation of anthropogenic heat emission in Beijing based on population and energy consumption data [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 38(1): 89−99. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2020)-01-0089

Weng Q H, Yang S H. 2004. Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city [J]. J. Environ. Manage., 70(2): 145−156. doi:10.1016/j.jenvman.2003.11.006

邬昀, 任永建, 方思达. 2017. 武汉城市热岛效应及其影响要素分析 [J]. 气象与减灾研究, 40(1): 43−50. Wu Yun, Ren Yongjian, Fang Sida. 2017. Analysis of the urban heat island effect in Wuhan and its influence elements [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 40(1): 43−50. doi:10.12013/qxyjzyj2017-007

杨士弘, 张茂光, 曾荣青. 1984. 广州城市热岛分析 [J]. 华南师范大学学报 (自然科学版), (2): 113−117. Yang Shihong, Zhang Maoguang, Zeng Rongqing. 1984. Analysis of Guangzhou urban heat island [J]. Journal of South China Normal University (Natural Science) (in Chinese), (2): 113−117.

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. doi:10.1175/JAMC-D-12-0125.1

Yang W M, Chen B, Cui X F. 2014. High-resolution mapping of anthropogenic heat in China from 1992 to 2010 [J]. Int. J. Environ. Res. Public Health, 11(4): 4066−4077. doi:10.3390/IJERPH110404066

杨元建, 石涛, 唐为安, 等. 2011. 气象台站环境的卫星遥感调查与评估——以安徽代表气象站为例 [J]. 遥感技术与应用, 26(6): 791−797. Yang Yuanjian, Shi Tao, Tang Weian, et al. 2011. Study of observational environment of meteorological station based remote sensing-cases in six stations of Anhui Province [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 26(6): 791−797. doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2011.6.791

杨萍, 刘伟东, 仲跻芹, 等. 2011. 北京地区自动气象站气温观测资料的质量评估 [J]. 应用气象学报, 22(6): 706−715. Yang Ping, Liu Weidong, Zhong Jiqin, et al. 2011. Evaluating the quality of temperature measured at automatic weather stations in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 22(6): 706−715. doi:10.11898/1001-7313.20110608

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. Changes in the spatial scale of Beijing UHI and urban development [J]. Science in China (Ser. D: Earth Sciences), 48(S2): 116–127. doi: 10.3969/j.issn.1674-7240.2005.z1.009

张光智, 徐祥德, 王继志, 等. 2002. 北京及周边地区城市尺度热岛特征及其演变 [J]. 应用气象学报, 13(S1): 43−50. Zhang Guangzhi, Xu Xiangde, Wang Jizhi, et al. 2002. A study of characteristics and evolution of urban heat island over Beijing and its surrounding area [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13(S1): 43−50. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2002.z1.005

张爱英, 任国玉, 周江兴, 等. 2010. 中国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差 [J]. 气象学报, 68(6): 957−966. Zhang Aiying, Ren Guoyu, Zhou Jiangxing, et al. 2010. The influence of urbanization on the change trend of surface temperature in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68(6): 957−966. doi:10.11676/qxxb2010.090

张志富, 任芝花, 张强, 等. 2013. 自动站小时气温数据质量控制系统研究 [J]. 气象与环境学报, 29(4): 64−70. Zhang Zhifu, Ren Zhihua, Zhang Qiang, et al. 2013. Analysis of quality control procedures for hourly air temperature data from automatic weather stations in China [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 29(4): 64−70. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2013.04.010

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

赵雪婷, 朱彬, 潘晨. 2019. 中国中东部地区不同气候背景下城市乡村气温差异研究 [J]. 气象科学, 39(5): 569−577. Zhao Xueting, Zhu Bin, Pan Chen. 2019. Research on temperature difference of urban-rural areas in different climate in central–eastern China [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 39(5): 569−577. doi:10.3969/2018jms.0044

中国气象局. 2003. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 151pp. China Meteorological Administration. 2003. Ground Meteorological Observation Specification (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 151pp.

周淑贞, 张超. 1982. 上海城市热岛效应 [J]. 地理学报, 37(4): 372−382. Zhou Shuzhen, Zhang Chao. 1982. On the Shanghai urban heat island effect [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 37(4): 372−382. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.1982.04.004

周淑贞, 束炯. 1994. 城市气候学 [M]. 北京: 气象出版社, 629pp. Zhou Shuzhen, Shu Jiong. 1994. Urban Climatology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 629pp.