doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.01.024

基于多源遥感数据的城市热岛特征与机理研究

陈春辉[1]，马苗苗[2]
（1. 河南省地球物理空间信息研究院，河南 郑州 450000；2. 河南测绘职业学院，河南 郑州 450000）

摘　要：以长三角城市群为研究区，基于时序多源遥感数据，通过均值标准差法对城市热岛等级进行分类，研究长三角城市群城市热岛时空分异特征，同时从下垫面属性、人为活动和植被覆盖等角度探索其城市热岛形成机制，可为缓解城市热岛效应提供一定参考。研究结果表明，长三角城市群2013—2018年城市热岛现象明显且呈增强趋势，其城市热岛空间分布呈现“M”型空间分布，具有较强的时空分异；浙江省和江苏省大部分城市的城市热岛较强，而安徽省大部分城市的城市热岛分布范围较小。长三角城市群的城市热岛与建成区空间分布表现出一致性，其热岛效应的增强与建成区和郊区林地面积的增长有关；长三角城市群的城市热岛与夜间灯光分布和植被覆盖空间分布均呈现空间一致性，城市热岛与夜间灯光强度成正比关系，与植被覆盖呈反比关系。

关键词：城市化；城市热岛；地表温度；MODIS
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）01-0119-04

Characteristics and Mechanism of Urban Heat Island Based on Multi-source Remote Sensing Data

CHEN Chunhui[1], MA Miaomiao[2]
(1. Henan Institute of Geophysical Space Information, Zhengzhou 450000, China;
2. Henan College of Surveying and Mapping, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Based on multi-source remote sensing data in time series, we classified urban heat island(UHI) classes by means of standard deviation method, and studied the spatio-temporal characteristics of UHI in the Yangtze River Delta(YRD). Then, we explored the formation mechanism of UHI from the perspectives of underlying surface properties, human activities and vegetation coverage. The results showed that UHI phenomenon in YRD was obvious and showed an increasing trend from 2013 to 2018. The spatial distribution of UHI in the form of “M” and showed strong spatio-temporal differentiation. The UHI of most cities in Zhejiang Province and Jiangsu Province were strong, while the UHI of Anhui Province was small for most of the cities. The spatial distribution of UHI in YRD was consistent with that of the built-up area, and the enhancement of UHI effect was related to the increase of built-up area and suburban forest area. The UHI of YRD was in spatial consistency with the distribution of nighttime light and the spatial distribution of vegetation coverage. The UHI of YRD was positively related to the intensity of nighttime light and negatively related to the vegetation coverage. This study explored the formation mechanism of UHI, which could provide some references for alleviating UHI effect.

Key words: urbanization, UHI, land surface temperature, MODIS

城市化进程的加快促进了社会经济的增长，但也会导致一系列问题，如城市扩张导致大量自然用地类型转化为人工铺砌面、城市建筑物、道路等不透水面，使得城市地表吸热属性发生变化，从而导致城市区域的温度高于周围郊区，产生了城市热岛现象。城市扩张和城市化进程的进一步加快，将导致城郊温差的进一步加大。由于城市热岛对城市环境、城市气候和城市居民居住舒适度会产生显著影响[1-2]，因此对城市热岛进行有效监测一直是城市规划、气候环境监测的重点问题。

早期的城市热岛监测主要是基于气象站点得到的气温数据，但由于“点状”站点数据并不具有空间代表性和全面覆盖性，因此由气温站点数据观测得到的城市热岛效应具有相应的局限性[3]。随着遥感技术的发展，由热红外遥感影像观测得到的地表温度具有相对优势。常用数据主要包括 Landsat 和 MODIS 数据，其中 Landsat 数据空间分辨率较高，更适合中小尺度的城市热岛现象研究[4-6]；MODIS 数据空间覆盖性广且数据可获取的时间序列长，更适合大区域范围的研究[3,7-12]。目前，关于城市热岛现象的研究主要可分为城市热岛时空变化研究以及城市热岛影像因素和归因分析研究两个方面，前者大多选用某一时刻的单幅或

收稿日期：2021-03-02。

少数几幅地表温度影像[7,13-15]；后者大多基于某一单一方面进行城市热岛归因分析，如土地覆被角度、植被角度[16-17]，有待进一步对城市热岛的时空变化研究和形成机制研究进行整合，详细探讨其时空特征和形成机制。因此，本文以长三角城市群为研究区，基于多源遥感数据，研究了长三角城市群城市热岛的时空分布特征，并进一步从下垫面属性、人为活动和植被覆盖等角度全面揭示了其形成机制。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

长三角城市群位于32°34′~29°20′N、115°46′~123°25′E之间，地处长江中下游，濒临黄海和东海，是长江入海处形成的冲击平原。长三角城市群涵盖上海市以及江苏省、浙江省、安徽省等26个城市，区域面积达21.17万km^2，约占我国总面积的2.2%，总人口为2.25亿人。长三角城市群以超大城市上海为中心，同时包括特大城市南京和杭州以及Ⅰ型大城市苏州和合肥。作为我国核心城市群，长三角城市群经济发展迅速，贡献了全国约1/4的GDP。长三角城市群属亚热带季风气候，常年高温多雨，其年均温、最高温和最低温都有显著增加趋势。随着长三角城市群社会经济的发展，高楼林立、工业化程度高，导致其热岛现象十分明显。因此，对长三角城市群的城市热岛现象进行实时有效监测具有实际意义与价值。

1.2 研究数据与预处理

本文采用的多源遥感数据主要包括MODIS地表温度数据、MODIS土地利用数据、MODIS植被指数数据与夜间灯光数据。MODIS地表温度数据包括日地表温度数据、8 d合成地表温度和月合成地表温度数据。为权衡空间覆盖性和时间分辨率，本文采用的地表温度数据为8 d合成的地表温度（MYD 11A2），空间分辨率为1 km，由日地表温度均值合成而来。数据源格式为HDF文件，通过MODIS数据处理软件MODIS_Reprojection_Tool（MRT），结合IDL二代开发语言，批量进行影像拼接、重投影和裁剪，得到长三角城市群每8 d合成的地表温度tif影像；再将8 d合成地表温度影像进行均值年合成，得到长三角城市群年合成地表温度影像。本文采用的MODIS土地利用数据为MCD12Q1，空间分辨率为500 m，时间分辨率为1 a。同样，通过MRT处理软件，对源HDF文件进行处理，得到土地利用tif影像。该土地利用数据将地表分为17种类型，对其进行进一步处理，合并为林地、灌木地、草地、耕地、建成区、裸土、湿地和水体8种用地类型。MODIS植被指数数据（MYD13A1）包括归一化植被指数（NDVI）和增强型植被指数（EVI），空间分辨率为500 m，时间分辨率为16 d。NDVI数据对植被低覆盖区域（如城市区域）较为敏感，因此本文选择NDVI数据。数据源格式同样为HDF文件，通过数据预处理，得到长三角城市群NDVI影像；再通过最大值合成法得到长三角城市群年NDVI影像。本文采用的夜间灯光数据为NPP-VIIRS影像，空间分辨率为500 m，包含月合成夜间灯光影像和年合成夜间灯光影像。本文采用长三角城市群年合成夜间灯光影像。由于NPP-VIIRS夜间灯光数据包含背景噪声、火光、天然气以及火山等，需去除上述影响因素，因此以0.5为阈值去除其影响。另外，由于NPP-VIIRS数据在2011年10月以后才有数据，因此本文选用2013—2018年的夜间灯光影像作为研究数据。

为与地表温度影像空间分辨率保持一致，将所有数据统一重采样至1 km，同时为保证数据时间序列的一致性，数据选用的时间范围均为2013—2018年。

1.3 城市热岛等级分类方法

为研究长三角城市群的城市热岛时空特征，本文利用均值标准差法对长三角城市群的城市热岛进行等级分类。首先，为消除不同影像时相不同带来的差异，对地表温度进行归一化处理，即

$$T_{norm}=(T-T_{min})/(T_{max}-T_{min}) \tag{1}$$

式中，T_{norm}为归一化后的地表温度，范围为0~1；T_{max}和T_{min}分别为地表温度最大值和最小值；T为每个地表温度像元的值。

然后，在Matlab中利用均值标准差法对归一化后的地表温度进行城市热岛等级分类。该方法通过地表温度均值与标准差的倍数关系划分城市热岛[3]，将研究区分为强负热岛、较强负热岛、弱负热岛、无热岛、弱热岛、较强热岛和强热岛7个城市热岛等级。

$$\begin{cases} T_s>\mu+1.5\text{std}, \text{强热岛} \\ \mu+\text{std}<T_s<\mu+1.5\text{std}, \text{较强热岛} \\ \mu+0.5\text{std}<T_s<\mu+\text{std}, \text{弱热岛} \\ \mu-0.5\text{std}<T_s<\mu+0.5\text{std}, \text{无热岛} \\ \mu-\text{std}<T_s<\mu-0.5\text{std}, \text{弱负热岛} \\ \mu-1.5\text{std}<T_s<\mu-\text{std}, \text{较强负热岛} \\ T_s<\mu-1.5\text{std}, \text{强负热岛} \end{cases} \tag{2}$$

2　研究结果与分析

2.1　长三角城市群城市热岛时空特征

长三角城市群2013—2018年城市热岛时空分布特征如图1所示，可以看出，长三角城市群表现出明显的城市热岛现象，城市热中心突出；其城市热岛贯穿合肥、南京、苏锡常地区，形成以上海、杭州和宁波为顶点的“M”型空间分布特征。从空间分布上看，长三角城市群中，浙江省和江苏省大部分地区都表现出强热岛中心，如江苏省的苏锡常地区、南京等，浙江省的杭州、金华、宁波和绍兴等；而安徽省的城市，除了合肥表现出强热岛中心，其他城市的热岛范围较小，均表现为零星散点式分布。从时间变化来看，2013—2018年长三角城市群的城市热岛现象进一步突出，热岛范围进一步扩大，具体表现为：热岛强度进一步增强，如上海、台州和无锡等；另外，一些小城市的城市热岛现象明显增强，如安徽省的大部分城市，其城市热岛范围呈零星点状形态进一步扩张。

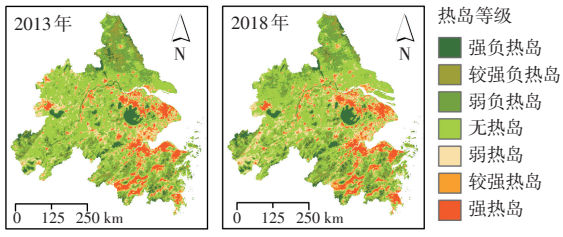


图1　长三角城市群城市热岛空间分布

长三角城市群2013—2018年不同城市热岛等级面积占比如表1所示，可以看出，与长三角城市群的城市热岛空间变化一致，长三角城市群的城市热岛呈现增强趋势。强热岛和弱热岛等级均呈波动增加趋势，截至2018年，二者所占比例分别增加了0.27%和0.92%；而较强热岛和无热岛等级占比有所减少，截至2018年，二者分别减少了0.05%和0.07%，说明有向强热岛等级增加的趋势；弱负热岛和较强负热岛等级占比也有所减少，截至2018年，二者分别减少了0.08%和0.53%，说明长三角城市群的温度呈逐渐升高趋势。

表1　长三角城市群不同热岛等级面积所占比例/%

热岛等级	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
强负热岛	5.57	5.84	5.53	5.83	6.03	5.74
较强负热岛	7.42	6.55	7.27	6.94	7.22	6.89
弱负热岛	15.93	14.09	16.16	14.52	13.53	15.85
无热岛	44.83	47.83	44.60	46.89	48.29	44.76
弱热岛	12.03	12.26	12.39	11.82	11.11	12.95
较强热岛	6.54	6.36	6.80	6.53	6.42	6.49
强热岛	7.05	7.07	7.25	7.47	7.41	7.32

2.2　长三角城市群城市热岛与土地覆被的关系

长三角城市群2013—2018年土地利用类型的空间分布情况如图2所示，可以看出，长三角城市群的城市化进程明显，表现出明显的城乡界线；长三角城市群的土地覆被空间分布与城市热岛的空间分布一致，建成区温度偏高，表现为强热岛或较强热岛等级，而林地、水体和草地等自然土地利用类型温度较低，表现为负热岛等级；2013—2018年长三角城市群的建成区范围有所扩张，主要表现为大城市沿主城区向周围扩大，其他小城市的城市范围也进一步扩大，这与长三角城市群的城市热岛时空变化趋势是一致的。

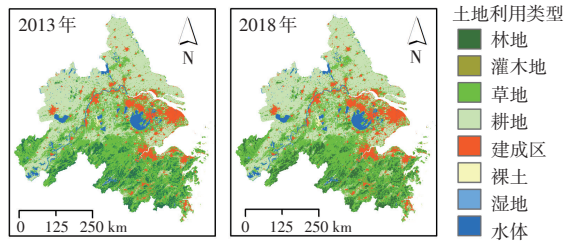


图2　长三角城市群土地覆被空间分布

长三角城市群不同土地利用类型所占面积变化情况如表2所示，可以看出，2013—2018年长三角城市群的建成区范围逐渐扩大，2018年建成区范围已增长2 049 km^2，而建成区中高楼大厦、水泥路面等特殊吸热属性导致其在白天易吸收大量热量，从而具有相对较高的温度。长三角城市群不同土地利用类型的地表温度统计如图3所示，可以看出，建成区具有最高的地表温度，因此建成区用地扩张导致了长三角城市群城市区域温度的增长，从而导致城市热岛现象的增强；湿地、水体和灌木地覆盖范围所占面积变化不大，主要变化为林地和草地，具体体现为草地面积逐渐减少，截至2018年已减少3 796 km^2，而林地所占面积逐渐增加，截至2018年增加了1 020 km^2；水体、林地等自然土地利用类型具有相对较低的温度，因此长三角城市群的城市热岛增强还与郊区林地的增加有关。

表2　长三角城市群不同土地利用类型所占面积/km^2

年份	林地	灌木地	草地	耕地	建成区	裸土	湿地	水体
2013	21 434	0	77 976	80 901	21 456	3 683	117	9 139
2014	21 460	0	78 225	79 958	21 941	3 858	120	9 144
2015	21 842	2	77 857	79 335	22 266	4 120	121	9 163
2016	21 960	1	77 651	78 912	22 548	4 352	116	9 166
2017	22 241	2	75 876	79 722	23 126	4 465	105	9 169
2018	22 454	1	74 180	80 700	23 505	4 604	120	9 142

2.3　长三角城市群城市热岛与人为活动的关系

长三角城市群2013—2018年夜间灯光强度的空间

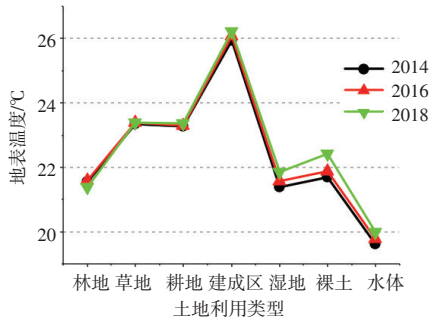


图3 长三角城市群各土地利用类型温度统计

分布如图4所示，可以看出，长三角城市群夜间灯光强度空间分布基本可体现其城市化进程和城市热岛的空间分布，其空间覆盖范围与城市热岛图中的强热岛等级以及土地利用图中的建成区空间分布是一致的。相较于2013年，长三角城市群在2018年的夜间灯光强度进一步增强，具体表现为上海、苏锡常地区、杭州和南京等夜间灯光强度在主城区进一步增强，同时沿着主城区向郊区扩张；盐城、宣城、安庆等一些中小城市的夜间灯光强度在2018年进一步突显，表现为明显的零星散点状。长三角城市群的夜间灯光强度空间变化可体现城市化进程，同时反映人为热的变化情况。长三角城市群各热岛等级对应的夜间灯光强度均值统计如图5所示，可以看出，长三角城市群的城市热岛与夜间灯光强度表现为正相关关系，随着城市热岛等级的增加，其对应的夜间灯光强度也呈逐渐增长趋势。夜间灯光强度可代表城市人为活动，还可体现人为热释放的多少，与城市热环境息息相关，是城市热岛形成的重要因素。

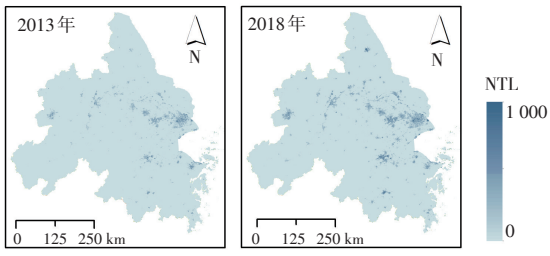


图4 长三角城市群夜间灯光强度空间分布

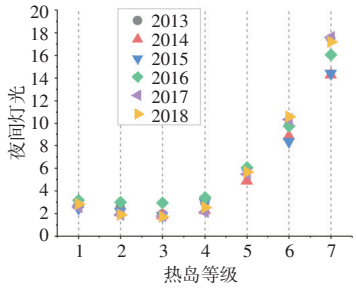


图5 长三角城市群热岛等级的夜间灯光强度

注：图中数字1~7分别代表强负、较强负、弱负、无、弱、较强与强热岛。

2.4 长三角城市群城市热岛与植被覆盖的关系

长三角城市群2013—2018年植被覆盖空间变化情况如图6所示，可以看出，2013—2018年长三角城市群的植被覆盖具有明显的空间分异，其中城市区域的植被覆盖较低，NDVI值均在0.4以下，核心城区的NDVI均在0.3以下；而郊区的植被覆盖较高，NDVI基本都在0.5以上。植被覆盖与城市热岛的形成息息相关，植被的蒸腾作用可带走大量热量，因此植被具有降低温度的作用。2013—2018年长三角城市群各城市热岛等级的植被覆盖情况如图7所示，可以看出，对于强热岛至无热岛（等级4~7），城市热岛与植被覆盖呈反比关系，城市热岛等级越高，植被覆盖度越低；对于负热岛（等级1~3），由于这3个热岛等级主要分别代表水体和植被，因此随着热岛等级的升高，其植被覆盖度也越来越高。另外，由图6可知，2018年长三角城市群郊区的植被覆盖有所增加，特别是长三角南部地区。城市热岛是指城市温度高于郊区的一种现象，因此郊区植被覆盖增加导致其温度减少，从而增强了长三角城市群的城市热岛效应。

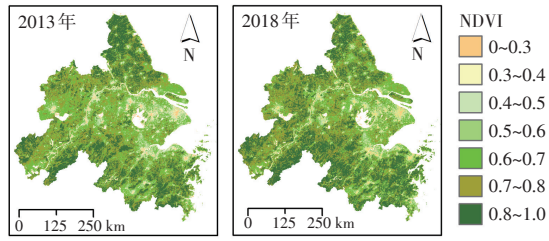


图6 长三角城市群植被覆盖空间分布

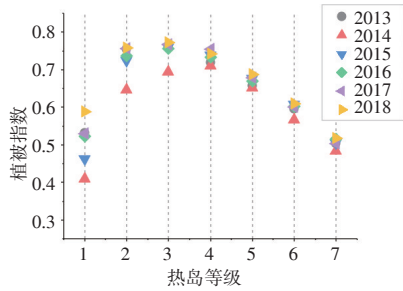


图7 长三角城市群热岛等级的植被覆盖统计

注：图中数字1~7分别代表强负、较强负、弱负、无、弱、较强与强热岛。

3 结 语

基于多源遥感数据，本文通过均值标准差法对城市热岛等级进行分类，研究了长三角城市群2013—2018年城市热岛的时空变化特征，并从下垫面属性、人为活动和植被覆盖等角度研究了长三角城市群城市热岛的形成机制。

（下转第139页）