

多空间尺度下城市热环境与不透水面聚集密度响应关系

孟庆岩^{1,2,3,4}, 王子安^{1,2,3,4}, 张琳琳^{1,2,3,4}, 孙震辉^{3,5},
胡蝶^{1,2,3,4}, 杨天梁^{3,4}

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 三亚中科遥感研究所, 三亚 572029;

4. 中国科学院空天信息研究院海南研究院, 三亚 572029;

5. 天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384

摘要: 针对以往城市热环境与不透水面聚集密度响应规律研究不足的问题, 本文以北京市为例, 基于MODIS数据计算城建区与边缘区平均温度差值为热岛强度, 结合热岛强度等级特征, 选取热岛强度等级期望值较高的6个典型区域(I 西二旗、西三旗、回龙观, II 东四、地安门、新街口, III 丰台区中部, IV 四惠、定福庄、东坝, V 石景山区, VI 北四环四季青桥附近), 研究热岛强度等级与不透水面聚集密度的响应关系; 进而利用Landsat数据反演地表温度, 研究城建区与精细尺度下地表温度对不透水面聚集密度响应临界点与最优尺度。结果表明: (1) 不同热岛强度等级的出现频率、其在白天与夜间的变化程度与不透水面聚集密度有一定相关性, 且相近的不透水面聚集密度下所表现出热岛强度的变化特征相似。(2) 主要城建区内地表平均温度与不透水面聚集密度的分布特征存在较显著的一致性, 随着尺度半径 r 的增大其响应越明显。且地表温度对不透水面聚集密度的响应存在一个临界点, 随着尺度半径 r 减小, 响应临界点逐渐增大: 尺度半径 $r=1000$ m时, 不透水面聚集密度达到60%后其影响趋于减弱; $r=500$ m、 $r=300$ m时临界点分别为69%与83%。(3) 不同典型区域的最优尺度存在差异, 西二旗、西三旗、回龙观最优尺度为150 m, 东四、地安门、新街口与四环四季青桥附近为60 m, 而季节变化对最优尺度的影响较小。该最优尺度可在一定程度上衡量不同区域不透水面分布的破碎程度及地表类型的单一程度。本研究可为城市规划与管理、城市热岛治理提供参考依据。

关键词: 热岛效应, 不透水面聚集密度, 城建区, 临界点, 响应规律

引用格式: 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

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 Sensing Bulletin, 26(9): 1789–1801 [DOI: 10.11834/jrs.20210263]

1 引言

随着城镇化进程不断加快, 城市热岛 (Urban Heat Island, UHI) 效应不断加剧。研究和治理城市热岛效应在能源消耗、空气质量、环境健康等方面发挥着重要作用 (Quattrochi等, 2000)。造成城市热岛的一个重要原因是不透水面性质的改变,

城市建设使人工表面代替土壤和草地等自然地面, 进而改变了反射和辐射的性质, 导致热岛效应的加剧 (Carlson 和 Arthur, 2000; 周纪等, 2008)。因此, 研究城市热环境与不透水面间的关系, 对进一步提高人居环境质量和治理城市热岛具有重要意义。

纵观城市热环境与不透水面关系研究, 主要

收稿日期: 2020-07-14; 预印本: 2020-10-25

基金项目: 海南省重大科技计划(编号: ZDKJ2017009); 四川省科技计划(编号: 2018JZ0054); 国家高分辨率对地观测重大科技专项(编号: 05-Y30B01-9001-19/20-1)

第一作者简介: 孟庆岩, 研究方向为城市陆表环境遥感。E-mail: mengqy@radi.ac.cn

集中在城市或城市群区域水平上分析地表温度与植被、不透水面间的相关关系 (Estoque 等, 2017; Lu 和 Weng, 2006; Xian 和 Crane, 2006; Yuan 和 Bauer, 2007), 如上海市、北京市或其他大都市的地表参数变化对城市热环境的影响 (Bauer 等, 2004; 李伟峰 等, 2008; 乔治和田光进, 2015; 徐涵秋, 2009; 张新乐 等, 2008), 而基于不同尺度不透水面聚集密度空间分布格局, 分析其对城市热环境的影响研究较少, 且不够深入。基于城市区域尺度探讨城市热环境与不透水面的响应关系, 主要可分为线性与非线性相关关系 (Amiri 等, 2009; 唐菲和徐涵秋, 2013; Tran 等, 2006; Zhou 等, 2011)。一些学者利用线性回归、决策树分类器 (DTC) 或线性光谱混合分析 (LSMA) 等方法研究了城市热环境和不透水面的线性关系模型, 结果显示地表温度的升高是由于不透水面的增强, 而且进一步会加强热岛强度 (Ding 和 Shi, 2013; Lu 和 Weng, 2006; Mathew 等, 2016; Xiao 等, 2007; Yang 和 Pan, 2011); 也有一些学者认为, 地表温度或热岛效应与不透水面间存在非线性正相关关系, 如唐菲和徐涵秋 (2013) 对地表温度与不透水面、植被和水体间的关系进行研究, 发现地表温度与不透水面间存在一种近似指数的对应关系, 也就是相比于不透水面低的地区, 不透水面高的地区地表温度的升高更剧烈, 对其促进作用更强; Xian (2008) 和 Imhoff 等 (2010) 评估了城市热岛强度与美国大陆人口最多城市的发展强度、规模和生态环境间的关系, 发现地表温度与不透水面并非呈线性或指数相关, 而是呈二次多项式构成的“U型”关系。综上, 城市热环境与不透水面的响应关系研究较多, 但与不透水面聚集密度间的研究较少, 且精细尺度下二者间的响应规律仍不明确。因此, 本文综合考虑城建区及城市内部的不透水面变化, 研究城市热环境 (热岛等级、地表温度) 与不透水面聚集密度的响应规律。

本文首先使用 MODIS 数据监测热岛强度在时间尺度的变化特征, 在了解热环境基本现状及变化规律的基础上, 借助 Landsat 数据探索空间尺度上地表温度与不透水面聚集密度的关系, 并获得地表温度对不透水面聚集密度响应的临界点与最优尺度, 可为城市热岛防治及城市规划提供技术支撑。

2 数据与方法

研究区选择北京市, 下辖朝阳区、西城区、东城区等 16 个区县。气候为半湿润大陆性季风气候, 年平均气温为 11.5°C (杨沈斌 等, 2010)。北京市受地表特殊空间格局的影响, 属于典型的中心型热岛, 非常具有代表性 (王宪凯 等, 2021)。因此, 本文借助 MODIS 数据高时间分辨率的长时间序列优势, 探索热岛强度在时间尺度上的变化特征 (包括不同季节、白天及夜晚); 借助 Landsat 数据空间分辨率较高的优势探索地表温度与不透水面聚集密度的响应关系。

(1) MODIS 地表温度数据预处理。本文以 2005 年—2014 年北京市 MODIS 地表温度 8 d 合成数据产品 (MOD11A2) 为数据源 ([https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/\[2020-07-14\]](https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/[2020-07-14])), 包括白天和夜间地表温度产品共 826 景。由于北京市雾霾频率较高、云量较多, 有大量数据不可用, NASA 提供的 MODIS 8 d 合成地表温度产品, 空间分辨率为 1 km, 已对不合格数据进行融合、剔除等处理, 精度较高, 可直接用于地表温度研究, 省去繁琐的数据处理过程。利用 MODIS 重投影工具 (MRT), 进行数据裁剪、投影转换、拼接等预处理, 投影为 UTM、Zone50N。

(2) Landsat 数据地表温度反演。本文使用的 Landsat 数据有 Landsat 7、Landsat 8 无云或少云数据共 14 景 (2013-09-01—2014-07-26), 来自美国地质勘探局 (USGS), 可从 [https://earthexplorer.usgs.gov/\[2020-07-14\]](https://earthexplorer.usgs.gov/[2020-07-14]) 免费下载得到。Landsat 7、Landsat 8 热红外波段的波谱范围为 $10.4\text{--}12.5\text{ }\mu\text{m}$, 空间分辨率分别为 60 m 和 100 m, 较适合研究城市内部的热环境特征。由于 Landsat 7 卫星的 ETM+ 只有一个热红外波段 (中心波长为 $11.457\text{ }\mu\text{m}$), Landsat 8 数据设有两个热红外波段 (Band10、Band11 中心波长分别为 $10.9\text{ }\mu\text{m}$ 、 $12.0\text{ }\mu\text{m}$), 因 Band11 运行出现问题, 故利用 Band10 单波段反演地表温度。

本文利用辐射传输方程法估算地表温度 (Beck, 1990; 覃志豪 等, 2003; Sobrino 等, 2008), 所需大气参数可通过 NASA 官方网页 ([http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/\[2020-07-14\]](http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/[2020-07-14])) 直接获得: 输入 Landsat 卫星过境时间、北京市中心经纬度 (39.91°N , 116.39°E)、大气模式 (根据过境时间

选择中纬度夏季或冬季) 并选择传感器类型 (ETM+、OLI 或 TIRS), 则会提供大气上下行辐射 $L_{\text{atm}}^{\uparrow}$ 和 $L_{\text{atm}}^{\downarrow}$ (单位: $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$), 以及大气路径的透过率 τ , 由 Plank 反函数求得真实地表温度 T_s (单位: K):

$$T_s = K_2 / \ln(K_1 / B(T_s) + 1) \quad (1)$$

式中, K_1 、 K_2 为预设的定标常数, $B(T_s)$ 为基于

普朗克定律得到的黑体在 T_s 下的辐亮度 (单位: $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$)。由于 Landsat 8 热红外波段分辨率为 100 m, Landsat 7 热红外波段分辨率为 60 m, 为方便后续研究, 将 Landsat 7 数据做重采样处理, 使其与 Landsat 8 地表温度数据分辨率一致, 得到 2013 年 9 月 1 日—2014 年 7 月 26 日北京市地表温度产品 14 景, 如图 1 所示。

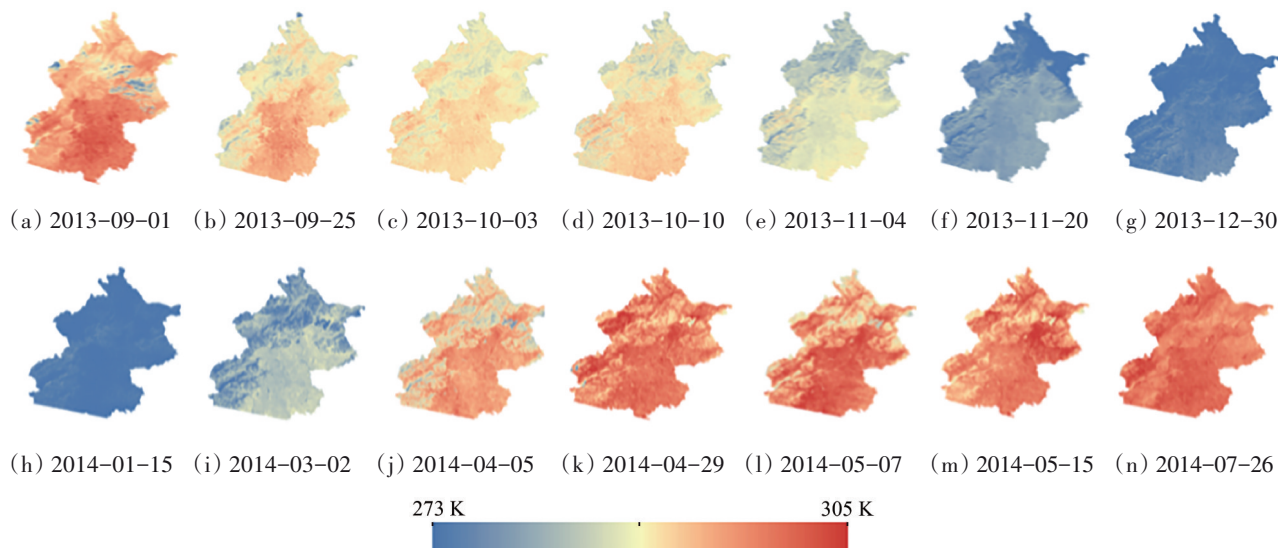


图 1 基于 Landsat 数据的北京市地表温度图

Fig. 1 Land surface temperature map of Beijing based on Landsat data

(3) 不透水面聚集密度计算。基于不透水面在城建区中分布密集而郊区稀疏的分布特点, 本文基于王靓等 (2015) 提出的不透水面聚集密度法提取主要城建区, 该方法能有效度量城市不透水面的聚集程度, 且可以保证下垫面类型的完整性。首先基于 Landsat 数据计算 BCI 指数以提取城市不透水面, 进而计算基于距离加权的不透水面聚集密度。

对于城市不透水面的提取, 本文采用 Deng 和 Wu (2012) 提出的生物物理成分指数 BCI (Biophysical Composition Index) 提取城市不透水面, 计算 BCI 指数前, 首先需对数据进行三步预处理工作, 分别是对水体进行掩膜、穗帽变换 (TC 变换) 和辐射定标。基于距离加权的不透水面聚集密度思想来源于 Ridd (1995) 提出的 V-I-S 模型 (Vegetation-Imperious-Soil), 将城市地表看作由土壤、不透水面和植被 3 种基本组分组成, 是一种将城市地物进行良好区分的城市环境指数。计算基于距离加权的不透水面聚集密度其基本原理

是以不透水面图像的每一个像元中心为中心点, 以距离作为权值 (即距中心点越近, 不透水面权值越大), 计算一定半径范围内不透水面的平均值 (Unger 等, 2009), 此平均值可体现半径范围内不透水面的分布密度, 也可以作为衡量建筑物聚集程度的指标。具体计算公式如下:

$$\text{Density}_s(r) = \frac{\sum_{i=1}^n B_{si} \cdot (1 - \frac{D_i}{2r})}{\sum_{i=1}^n (1 - \frac{D_i}{2r})} \quad (2)$$

式中, s 为中心点像元; r 为尺度半径; B_{si} 为半径 r 范围内像元值 (不透水面像元值为 1, 透水面像元值为 0); D_i 为像元 B_{si} 与中心点 s 间的距离。

(4) 热岛强度及等级划分。使用 2005 年—2014 年 MODIS 8 d 合成地表温度产品, 在计算不透水面聚集密度的基础上, 基于 CCA 聚类算法提取主要城建区范围, 以主要城建区面积 150% 的周边区域作为边缘区, 计算城建区与边缘区平均温度差值为热岛强度 (王靓 等, 2015)。依据可变阈值的方法 (王靓 等, 2015), 对热岛强度进行等级

划分。

定义第*i*年*j*月，第*k*天MODIS地表温度产品中像元(*x*, *y*)的热岛等级如表1所示，其中，*T_{ij}*(*k*, *x*, *y*)、*T_{B-ij}*、 ΔT_{ij} 分别为第*i*年*j*月的像元(*x*, *y*)地表温度、平均边缘区温度与平均热岛强度。基于不同热岛等级出现的频率，计算热岛强度等级期望值*E*，如下：

$$E = \sum i \cdot P_i \tag{3}$$

式中，*P_i*为10年（2005年—2014年）中第*i*级热岛出现的频率。*E*值代表出现热岛强度等级的期望值，*E*值越高，出现高等级热岛的概率越大。

表1 城市热岛强度等级定义	
Table 1 Definition of urban heat island intensity level	
热岛等级	定义
一级热岛	$T_{B-ij} \leq T_{ij}(k, x, y) < T_{B-ij} + \Delta T_{ij}$
二级热岛	$T_{B-ij} + \Delta T_{ij} \leq T_{ij}(k, x, y) < T_{B-ij} + 2\Delta T_{ij}$
三级热岛	$T_{B-ij} + 2\Delta T_{ij} \leq T_{ij}(k, x, y) < T_{B-ij} + 3\Delta T_{ij}$
四级热岛	$T_{B-ij} + 3\Delta T_{ij} \leq T_{ij}(k, x, y) < T_{B-ij} + 4\Delta T_{ij}$
五级热岛	$T_{ij}(k, x, y) \geq T_{B-ij} + 4\Delta T_{ij}$

3 典型区域选取

图2显示了北京市热岛强度等级期望*E*值的分布情况，可以看出白天*E*值的空间分布特征与城市

内建筑物密度相关性较大，与北京市不透水面聚集密度的分布(图3(a))较为一致。该值可能受到城市建筑密度、人口密度、交通分布以及城市结构的共同影响；同时北京市*E*值季节变化显著，秋冬季节出现高等级热岛的概率较大，春季次之，夏季较弱。这与张艳等（2012）的研究一致，原因之一可能是在秋冬季节，最稳定的天气出现频率比其他几个季节高，在此环境条件作用下，大气混合作用较弱，尤其反应在城市和郊区之间，有利于热岛的出现和发展，并且强度更强（张艳等，2012）。此外，城市热岛强度与国内生产总值、人为热排放、建成区面积及人口等人为因素有着密切相关的联系（季崇萍等，2006）。由于国内生产总值、建成区面积及人口季节差异不显著，而人为热排放的季节差异较明显，尤其体现在冬季与夏季，冬季从低强度向中高强度转化明显，夏季保持中高强度热岛，其转换较不显著（Gaffin等，2008）。

结合2005年—2014年北京市热岛强度等级期望值分布、不透水面分布与城区建设情况，选取热岛强度等级期望值较高的6个区域作为本文的典型研究区，分别为Ⅰ西二旗、西三旗、回龙观，Ⅱ东四、地安门、新街口，Ⅲ丰台区中部，Ⅳ四惠、定福庄、东坝，Ⅴ石景山区（不包括西北部山区）和Ⅵ北四环四季青桥附近，如图3(b)所示。

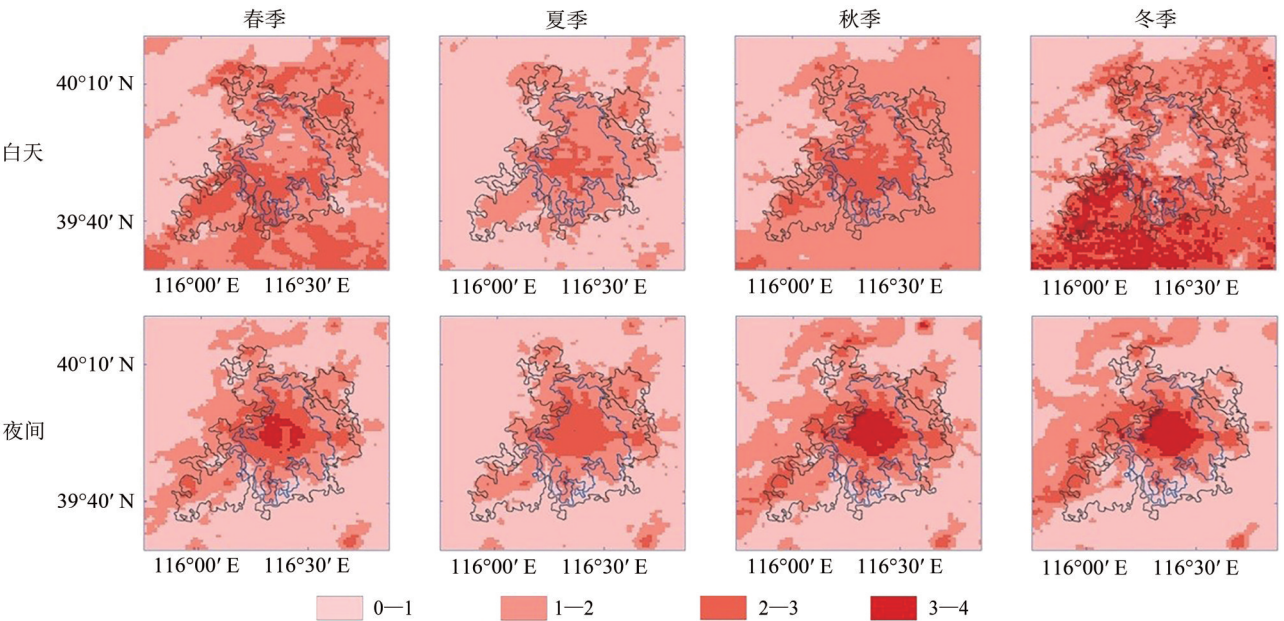


图2 北京市热岛强度等级期望值
Fig. 2 Expected value of Beijing heat island intensity level

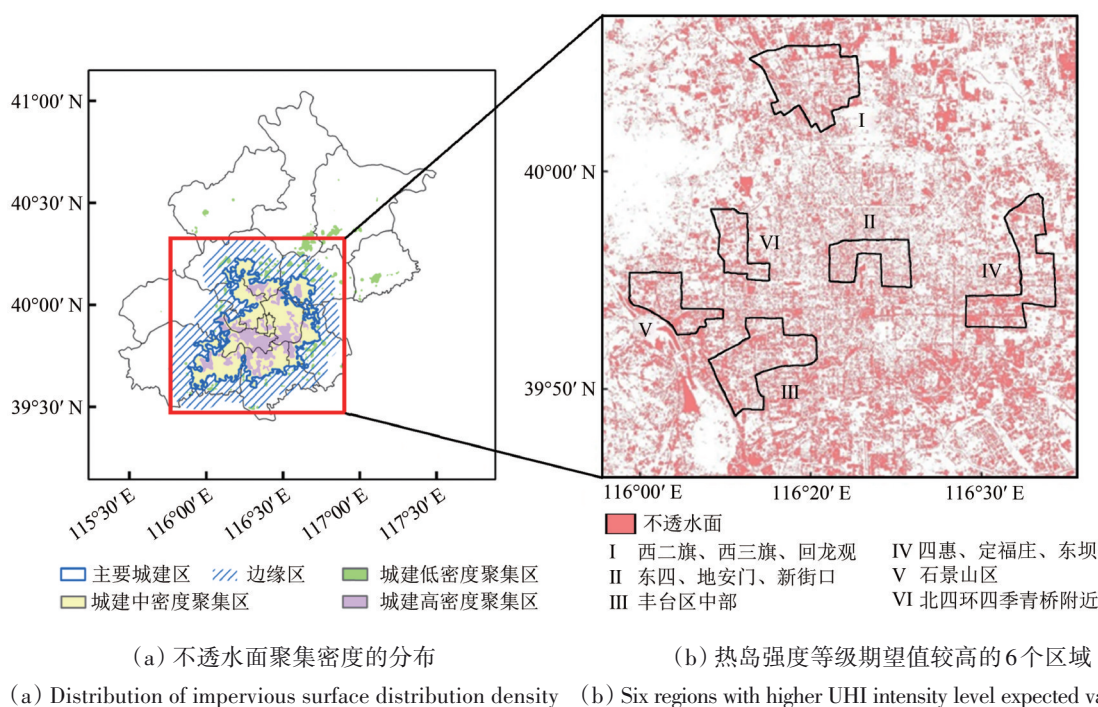


图3 北京市主要建成区内典型研究区

Fig. 3 Typical study areas in major urban construction areas in Beijing

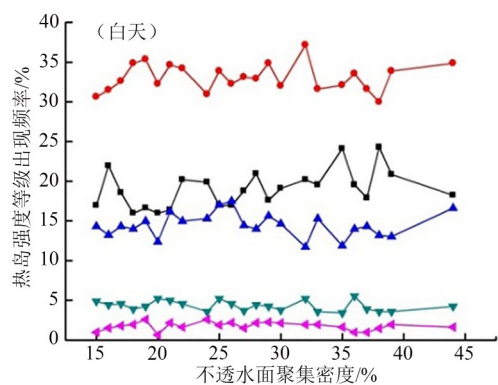
4 城市热环境与不透水面聚集密度响应关系分析

4.1 热岛强度等级与不透水面聚集密度响应关系

图4统计了2005年—2014年典型区域不同热岛强度等级出现频率与不透水面聚集密度的关系。白天, I—VI区域二级热岛强度的出现频率最高, 均为30%—35%左右; 四级、五级热岛强度的出现频率主要分布在5%以下, 且当不透水面聚集密度达到40%时有所上升(如研究区域Ⅲ所示); 而一级、三级热岛强度的出现频率有较明显的波动: I西二旗、西三旗、回龙观与Ⅵ北四环四季青桥附近, 不透水面聚集密度主要集中在10%—30%之间, 均值分别为26.71%与25.53%, 一级热岛强度的出现频率在20%左右, 而三级热岛强度的出现频率略低, 为15%左右。随着不透水面聚集密度的升高, 如Ⅲ丰台区中部, Ⅳ四惠、定福庄、东坝, Ⅴ石景山区(不包括西北部山区)不透水面聚集密度主要集中在15%—50%之间, 均值分别为30.02%、30.67%、31.83%, 三级热岛强度出现的频率高于一级热岛出现的频率, 该现象在不透水面聚集密度达到30%后较为明显, 其中研究

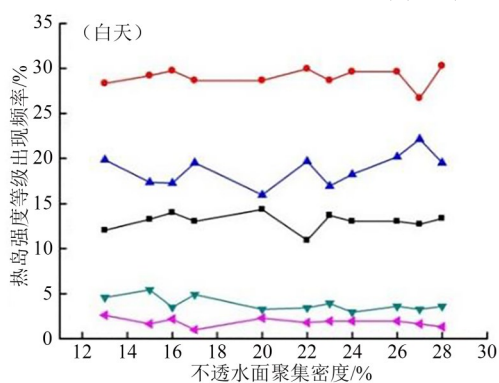
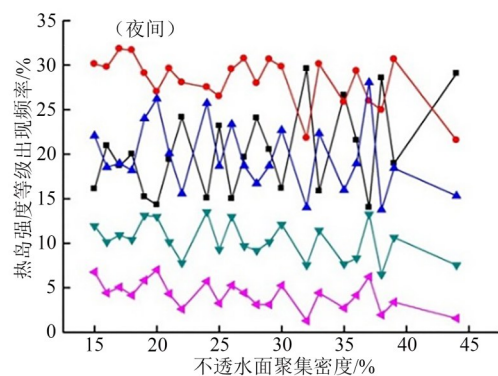
区域Ⅲ丰台区中部三级热岛强度出现的频率明显高于一级热岛强度, 该区域处于发展建设初期阶段, 植被覆盖度与其它两个区域相比较差。虽然典型研究区Ⅱ东四、地安门、新街口不透水面聚集密度均值最小, 为19.77%, 但仍表现出三级热岛强度高于一级热岛强度的现象, 可能是由于该区域属于北京市老城区中心的原因, 城市人口、交通等相对集中, 其热岛强度显著。

由图4可见, 对于同一区域夜间热岛效应的强度高于白天, 表现为: 三级、四级、五级热岛强度的出现频率明显上升, 一级、二级热岛强度的出现频率相应下降。其中, Ⅱ东四、地安门、新街口区域中, 白天与夜间的热岛强度变化最为明显: 四级热岛强度的出现频率明显上升, 白天出现频率主要分布在5%以下, 而夜间上升到20%以上, 并随不透水面聚集密度的增加而增加, 此外, 三级、五级热岛强度的出现频率上升也十分明显; Ⅲ丰台区中部, Ⅳ四惠、定福庄、东坝, Ⅴ石景山区(不包括西北部山区)区域夜间相较于白天, 不同热岛强度等级出现频率的变化程度略小于区域Ⅱ东四、地安门、新街口, I西二旗、西三旗、回龙观与Ⅵ北四环四季青桥附近区域差异程度最小。



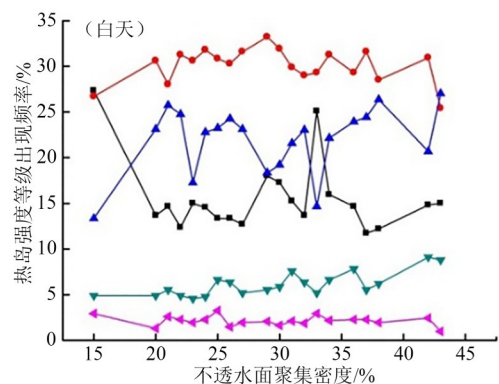
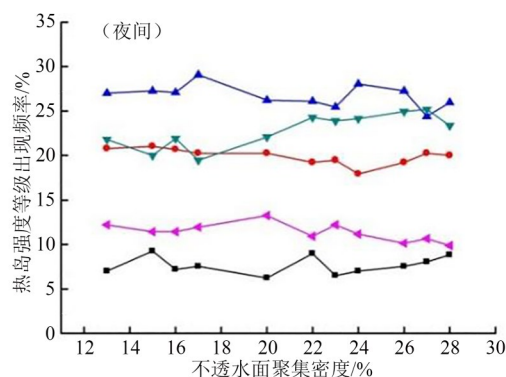
(a) I (西二旗、西三旗、回龙观)

(a) I (Xierqi, Xisanqi, Huilongguan)



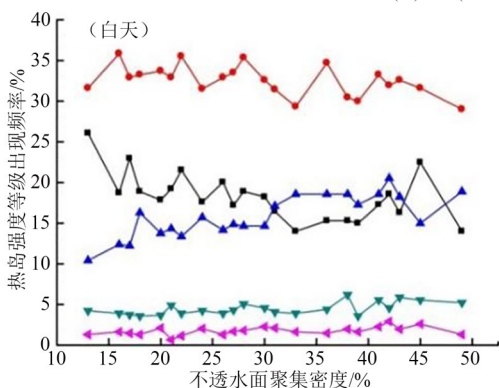
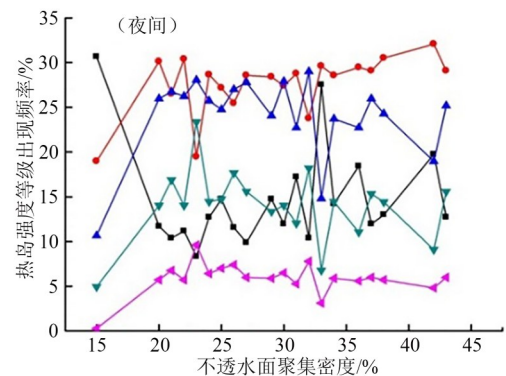
(b) II (东四、地安门、新街口)

(b) II (Dongsi, Di'anmen, Xinjiekou)



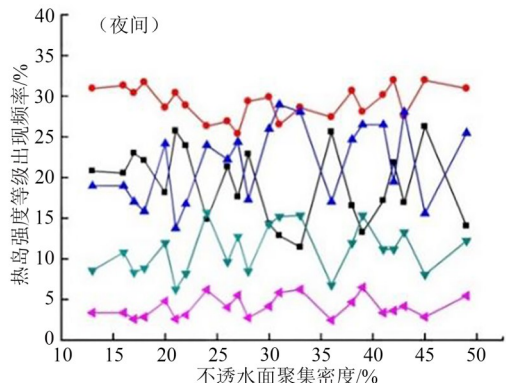
(c) III (丰台区中部)

(c) III (the middle of Fengtai District)



(d) IV (四惠、定福庄、东坝)

(d) IV (Sihui, Dingfuzhuang, Dongba)



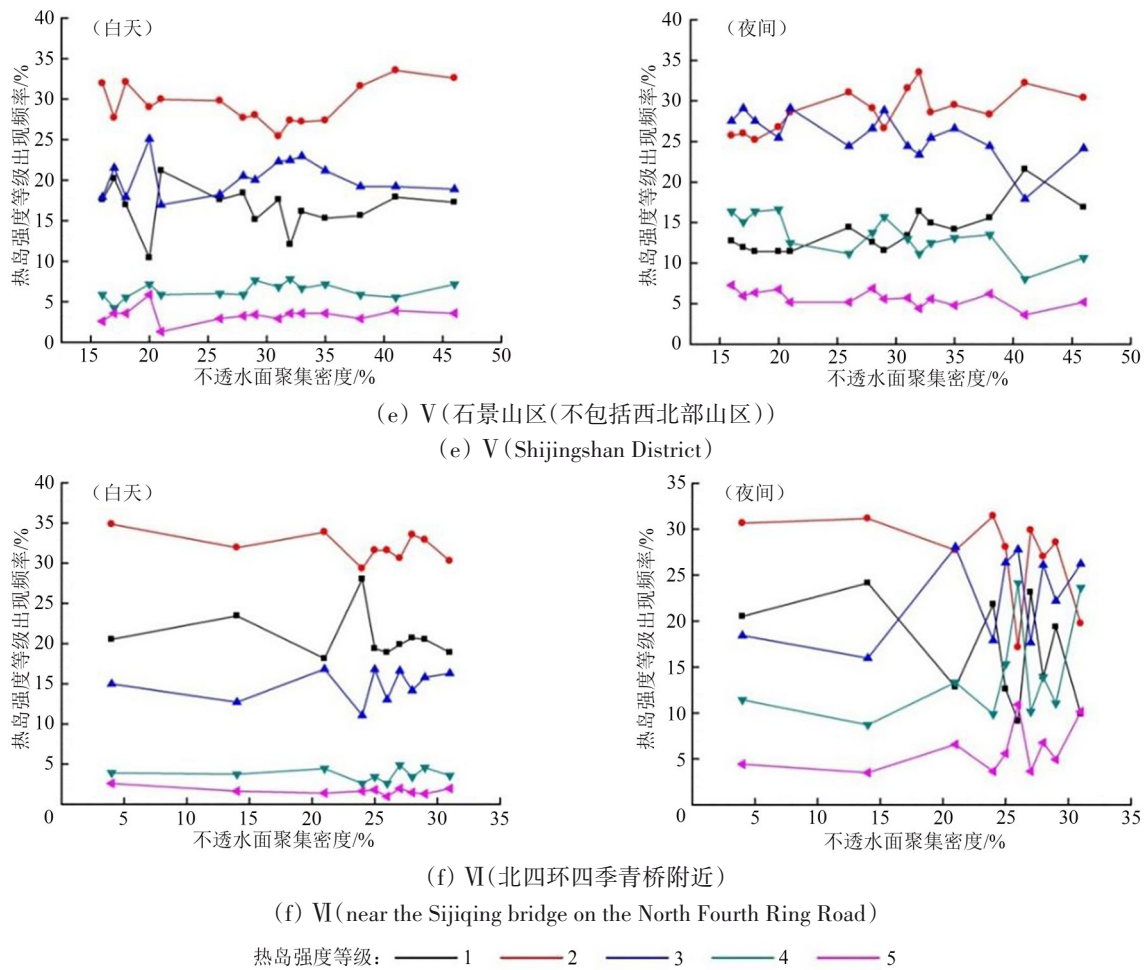


图4 北京市6个典型研究区热岛强度等级出现频率与不透水面聚集密度

Fig. 4 Frequency of heat island intensity level and impervious surface distribution density in six typical study areas in Beijing

由以上分析可知,不同热岛强度等级的出现频率、其在白天与夜间的变化程度与不透水面聚集密度有一定响应关系,且相近的不透水面聚集密度下所表现出的热岛强度的变化特征较为相似,上述6个区域可分为3类:(1)Ⅲ丰台区中部,Ⅳ四惠、定福庄、东坝,Ⅴ石景山区(不包括西北部山区),不透水面聚集密度均值分别为30.02%、30.67%、31.83%,且白天热岛效应较强;(2)Ⅰ西二旗、西三旗、回龙观,Ⅵ北四环四季青桥附近,其不透水面聚集密度均值分别为26.71%与25.53%;(3)Ⅱ东四、地安门、新街口,不透水面聚集密度均值最小,为19.77%,但由于其处于北京市中心,人口、交通密集,其表现为最强的热岛效应,白天与夜间的差异也最大。

4.2 地表温度与不透水面聚集密度响应临界点与最优尺度

基于2013年9月—2014年7月Landsat数据反演地表温度,将3—5月视为春季,6—8月为夏

季,9—11月为秋季,12—2月为冬季,图5显示了春夏秋冬4个季节北京市主要城建区地表平均温度,春季地表平均温度范围为275.19—307.06 K,夏季为292.69—312.39 K,秋季为274.10—302.22 K,冬季为252.63—285.58 K。从图5可以看出,基于Landsat数据北京市主要城建区地表平均温度依次为夏季>春季>秋季>冬季。可能是因为北京城区春季植被较少,地表温度较高,而山区以林地为主,地表植被覆盖较好,地表温度相对较低;夏季高温区面积大大增加,包含了大兴区北部、通州区西北部、昌平区东南部、顺义区西南部、房山区东部地区,并表现出以东城、西城为中心向外围区县扩散的趋势,且东部大于西部,这是由于中东部地区为平原地区,植被覆盖度较低,西部地区有山区覆盖,植被覆盖度较高,植被在夏季生长茂盛,可以起到降低地表温度的作用;秋季高温区较夏季明显减少,主要出现在城区及南部地区,是由于北京西、北和东北向环山,平原

和山区形成弧形屏障, 大气流动受到阻挡, 城区污染物不易向外扩散, 逆温现象频繁发生, 导致地表热量无法蒸散, 因此城区地表温度均值仍明

显高于郊区; 在冬季, 由于郊区地面为裸露土壤, 其蒸发量较小且干燥, 升温速度明显高于城区地表。

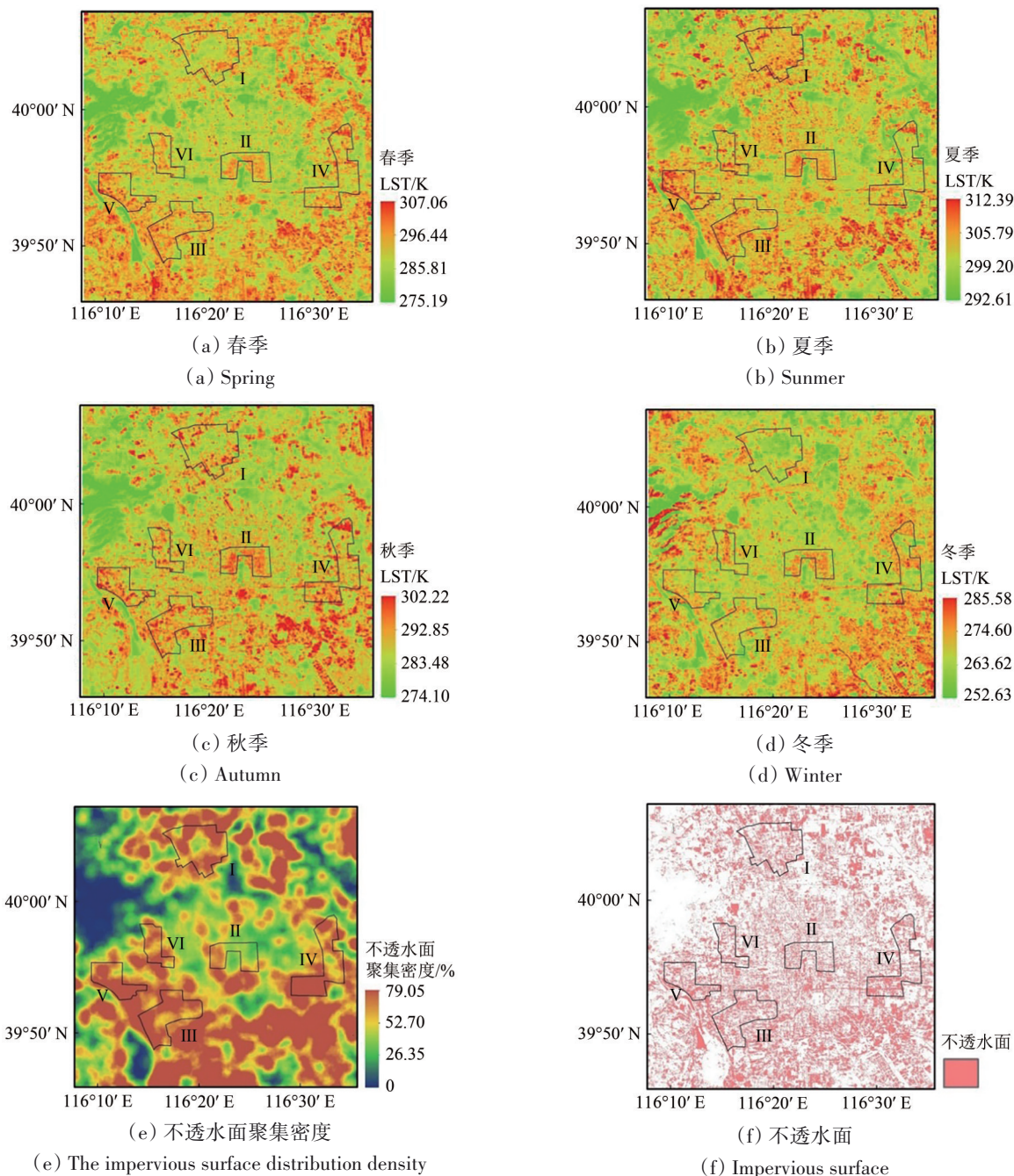


图5 基于Landsat数据的春夏秋冬4个季节北京市地表平均温度与不透水面分布
Fig. 5 Surface mean temperature and impervious surface distribution in Beijing based on Landsat data in four seasons (spring, summer, autumn and winter)

图5可以看出北京市春季、夏季、秋季、冬季地表平均温度的分布特征与不透水面聚集密度的分布特征存在较为明显的一致性: 不透水面聚集密度较高的区域地表平均温度也相应较高。

4.2.1 主要城建区

为进一步研究不透水面聚集密度对春季、夏季、秋季、冬季地表平均温度的影响, 图6统计了基于Landsat数据的春夏秋冬4个季节主要城建区

地表平均温度随不透水面聚集密度的变化规律。其中, 提供了不透水面聚集密度的4个尺度半径

($r=100\text{ m}$, $r=300\text{ m}$, $r=500\text{ m}$, $r=1000\text{ m}$)。

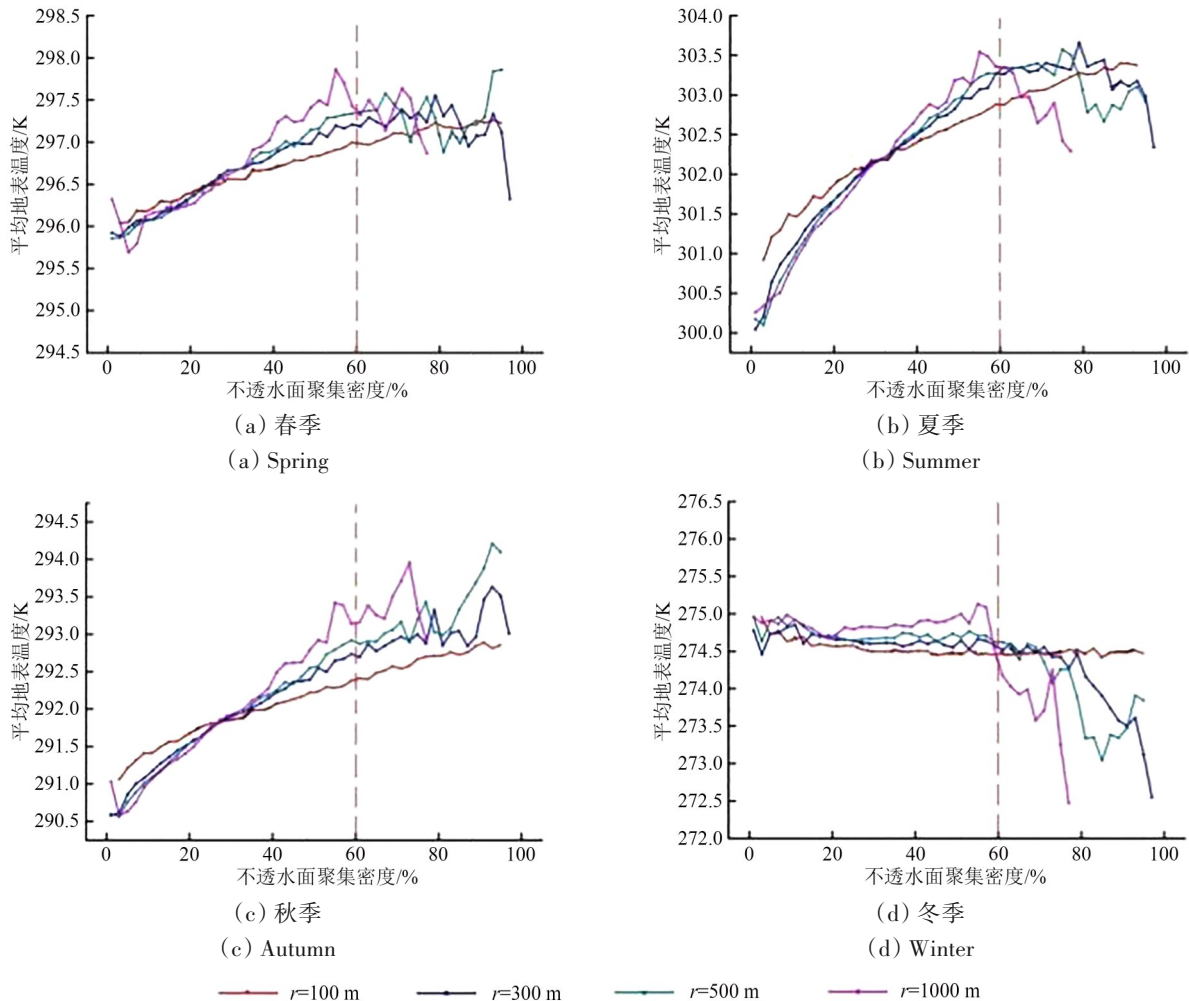


图6 春夏秋冬4个季节北京市主要城建区地表平均温度与不透水面聚集密度

Fig. 6 Surface mean temperature and impervious surface distribution density in the main urban construction areas of Beijing in four seasons (spring, summer, autumn and winter)

由图6可以看出, 春季、夏季、秋季不透水面聚集密度与地表温度之间存在显著正相关关系, 不透水面聚集密度变化对地表平均温度增加更敏感。地表平均温度随不透水面聚集密度的增加明显上升, 且随着尺度半径 r 的增大, 地表平均温度对不透水面聚集密度变化的响应越明显。半径 $r=100\text{ m}$ 时, 地表平均温度与不透水面聚集密度呈良好的正相关, 其相关系数均达到96%以上, 且地表平均温度对不透水面聚集密度的响应程度较为一致, 这可能与Landsat地表温度产品空间分辨率有关。

然而, 冬季不透水面聚集密度与地表温度的拟合度不如春季、夏季及秋季。究其原因, 可能是因为冬季的太阳高度角较小, 太阳辐射相比其他3个季节较弱, 所以对地表温度影响较小; 除此

之外, 冬季受集中供热的影响较大, 城市升温的主要原因是人类活动排放的热量以及建筑物对外的长波辐射。因此, 在高密度不透水面聚集密度区不透水面覆盖度与地表温度之间无明显相关性, 当不透水面聚集密度达到60%以上时甚至表现出负相关的异常现象, 出现“拐点”。一方面可能是因为高密度城建区主要集中在二、三四环的住宅区和四、五环之间的工业区, 工业区尤其集中分布在外环东部及东南部, 由于住宅区的平均高度大于厂房, 尤其在冬季其太阳高度角较低, 造成较高的住宅区投下较长的建筑阴影, 进而影响了地表对太阳辐射能量的获取。这与叶智威等(2009)和张佳华等(2005)的研究相一致, 他们的研究表明在较冷的季节, 植被的作用减弱, 由

三维变量测量的建筑环境的形态就变得更为重要，随着建筑高度和建筑密度的增加导致建筑遮阴面积增加、日照时间和太阳短波辐射量减少，进而导致地表温度下降。另一方面可能是由于风的影响，西北风为北京市冬季的主导风向，由于住宅区建筑较工业区高密，其为工业区形成一道天然风屏障，进而降低风速并减少热量流失；再者，推测此“拐点”可能是受人类影响区域和自然区域的分界点，不透水面聚集密度从0到“拐点”，主要集中在人类活动较强的城区，而从“拐点”到1，则主要集中在较少受人类活动影响的植被覆盖度高的区域。植被在夏季生长最好冬季最差，故此“拐点”夏季较高，冬季变低。

除此之外，在春季、夏季、秋季中，半径 $r \geq 300$ m时，地表平均温度与不透水面聚集密度的正相关性有所减弱，以 $r=1000$ m为临界点，当不透水面聚集密度大于60%时，地表平均温度随不透水面聚集密度的下降而降低，说明在该尺度半径下，不透水面分布情况对地表平均温度的影响趋于饱和，且曲线存在明显的震荡，表明地表平均温度与不透水面的相关性趋势变弱，这与王靓等（2015）研究中北京市主要城建区不同热岛等级出现频率随不透水面聚集密度变化的表现相一致。随着尺度半径 r 减小，该临界点逐渐增大， $r=500$ m、 $r=300$ m临界点分别为69%与83%。冬季 $r=50$ m、 $r=100$ m时，地表平均温度几乎不随不透水面聚集密度的变化而变化；当 $r \geq 300$ m时，在相应的不透水面聚集密度响应临界值之前，地表平均温度随不透水面聚集密度的增大变化很小，在大于响应临界值时，地表平均温度随不透水面聚集密度的变化出现明显的震荡。

4.2.2 典型区域

从前文可以看出不同尺度半径下，北京市主要城建区内地表平均温度与不透水面聚集密度相关性存在明显差异。进一步选取尺度半径 $r=60$ m、90 m、120 m、150 m、180 m、210 m、240 m、270 m、300 m，分别在6个典型区域内，对地表平均温度与不透水面聚集密度的响应曲线进行二次拟合，选取拟合效果最好的尺度半径作为最优尺度，如表2所示。由于冬季地表平均温度受不透水面聚集密度影响较小，暂不涉及。

由表2看出，不同典型区域的最优尺度存在差异，如I西二旗、西三旗、回龙观最优尺度为

150 m，II东四、地安门、新街口与VI四环四季青桥附近为60 m；而季节变化对最优尺度的影响较小，如I、II、VI区域不随季节发生变化，而其他区域平均变化50 m。该最优尺度可在一定程度上衡量不同区域不透水面分布的破碎程度及地表类型的单一程度。当不透水面分布较为完整时，不透水面聚集密度较大，其最优尺度也较大，表现为III、IV、V区域；当不透水面分布破碎度较高时，其地表平均温度与不透水面聚集密度相关性受植被、水体等地表分布的影响，最优尺度相应减小。

表2 北京市6个典型区域地表平均温度与不透水面聚集密度相关系数与最优尺度

Table 2 Correlation coefficient and optimal scale of surface mean temperature and impervious surface distribution density in six typical study areas in Beijing

I 西二旗、西三旗、回龙观			
	春季	夏季	秋季
最优尺度	150 m	150 m	150 m
拟合公式	$295.372+2.2493 \cdot D-0.7474 \cdot D^2$	$301.382+3.8319 \cdot D-1.5467 \cdot D^2$	$290.890+3.0410 \cdot D-0.8540 \cdot D^2$
R^2	0.7959	0.9003	0.866
II 东四、地安门、新街口			
	春季	夏季	秋季
最优尺度	60 m	60 m	60 m
拟合公式	$295.844+2.9510 \cdot D-2.9493 \cdot D^2$	$301.841+2.4738 \cdot D-2.0510 \cdot D^2$	$292.020+2.5105 \cdot D-2.4598 \cdot D^2$
R^2	0.9610	0.9263	0.9840
III 丰台区中部			
	春季	夏季	秋季
最优尺度	120 m	120 m	90 m
拟合公式	$296.034+1.9394 \cdot D-0.2740 \cdot D^2$	$301.295+2.9802 \cdot D-0.4204 \cdot D^2$	$291.461+2.5978 \cdot D-0.4013 \cdot D^2$
R^2	0.8202	0.9274	0.9159
IV 四惠、定福庄、东坝			
	春季	夏季	秋季
最优尺度	240 m	240 m	180 m
拟合公式	$295.019+8.6052 \cdot D-9.1014 \cdot D^2$	$299.775+8.6861 \cdot D-7.2463 \cdot D^2$	$290.836+6.3058 \cdot D-4.9877 \cdot D^2$
R^2	0.7995	0.9156	0.8452
V 石景山区(不包括西北部山区)			
	春季	夏季	秋季
最优尺度	210 m	270 m	210 m
拟合公式	$296.475-0.0997 \cdot D+3.1326 \cdot D^2$	$302.190+0.7881 \cdot D+2.1530 \cdot D^2$	$291.563+1.0738 \cdot D+2.1966 \cdot D^2$
R^2	0.9169	0.9159	0.9579
VI 四环四季青桥附近			
	春季	夏季	秋季
最优尺度	60 m	60 m	60 m
拟合公式	$296.409-0.7950 \cdot D+1.4221 \cdot D^2$	$302.055+0.8813 \cdot D+0.2962 \cdot D^2$	$292.140-0.5343 \cdot D+1.2899 \cdot D^2$
R^2	0.9235	0.9289	0.8987

5 结 论

本文选取 Landsat 多光谱数据与 MODIS 8 d 合成地表温度产品数据, 计算不透水面聚集密度及热岛强度, 结合热岛强度等级的空间分布特征, 探讨城市热环境(热岛强度等级、地表温度)与不透水面聚集密度的响应关系, 研究结论如下:

(1) 不同热岛强度等级的出现频率、其在白天与夜间的变化程度与不透水面聚集密度有一定相关性, 且相近的不透水面聚集密度下所表现出热岛强度的变化特征相似。据此北京市 6 个典型区域可分为 3 类: 1) III 丰台区中部, IV 四惠、定福庄、东坝, V 石景山区(不包括西北部山区), 不透水面聚集密度均值分别为 30.02%、30.67%、31.83%, 且白天热岛效应较强; 2) I 西二旗、西三旗、回龙观, VI 北四环四季青桥附近, 其不透水面聚集密度均值分别为 26.71% 与 25.53%; 3) II 东四、地安门、新街口, 不透水面聚集密度均值最小为 19.77%, 但其表现为最强的热岛效应, 白天与夜间差异也最大。

(2) 主要城建区内春季、夏季、秋季地表平均温度的分布特征与不透水面聚集密度的分布特征存在较为明显的一致性。地表温度对不透水面聚集密度的响应存在一个临界点, 且随着尺度半径 r 减小, 响应临界点逐渐增大: 尺度半径 $r=1000$ m 时, 不透水面聚集密度达到 60% 后其影响趋于减弱; $r=500$ m、 $r=300$ m 临界点分别为 69% 与 83%。冬季不透水面聚集密度与地表温度的拟合度不如春季、夏季及秋季, 当不透水面聚集密度达到 60% 以上时甚至表现出负相关的异常现象, 出现“拐点”。

(3) 典型区域内最优尺度存在差异, 而季节变化对最优尺度的影响较小。该最优尺度可在一定程度上衡量不同区域的不透水面分布的破碎程度以及地表类型的单一程度。当不透水面分布较为完整时, 不透水面聚集密度较大, 其最优尺度较大; 当不透水面分布破碎度较高时, 其不透水面聚集密度与地表平均温度相关性受到植被、水体等地表分布的影响, 最优尺度相应减小。

本文侧重于水平结构上研究不透水面聚集密度与城市热环境的响应关系, 而城市化进程造成城市空间结构的变化, 还表现为垂直结构上城市三维几何特征的变化, 理解三维城市空间结构特

征及其对城市热环境的影响机制对于缓解城市热岛效应有着重要影响。接下来的研究将二维与三维因子结合, 拓宽城市热环境研究的视野, 既考虑城市热环境二维与三维特性的分布差异, 也考虑城市三维空间结构对其产生的影响。除此之外, 将从时间角度综合利用热红外遥感和气象站点观测数据, 开展城市热岛效应年际及四季差异对比的变化研究。从时空两个角度寻找突破口和创新点, 进一步在其他城市进行研究, 以强化研究结果, 丰富城市可持续发展和城市气候学理论的区域适应性分析。

参考文献(References)

- Amiri R, Weng Q H, Alimohammadi A and Alavipanah S K. 2009. Spatial - temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area, Iran. *Remote Sensing of Environment*, 113(12): 2606-2617 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.07.021]
- Bauer M E, Heinert N J, Doyle J K and Yuan F. 2004. Impervious surface mapping and change monitoring using Landsat remote sensing, ASPRS Annual Conference Proceedings, May 23—28, Denver, Colorado. Bethesda, MD: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Beck B R. 1990. Measurement of the Magnetic and Temperature Dependence of the Electron-electron Anisotropic Temperature Relaxation Rate. San Diego: University of California.
- Carlson T N and Arthur S T. 2000. The impact of land use — land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective. *Global and Planetary Change*, 25 (1/2): 49-65 [DOI: 10.1016/S0921-8181(00)00021-7]
- Deng C B and Wu C S. 2012. BCI: a biophysical composition index for remote sensing of urban environments. *Remote Sensing of Environment*, 127: 247-259 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.09.009]
- Ding H Y and Shi W Z. 2013. Land-use/land-cover change and its influence on surface temperature: a case study in Beijing city. *International Journal of Remote Sensing*, 34(15): 5503-5517 [DOI: 10.1080/01431161.2013.792966]
- Estoque R C, Murayama Y and Myint S W. 2017. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: an urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Science of the Total Environment*, 577: 349-359 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.195]
- Gaffin S R, Rosenzweig C, Khanbilvardi R, Parshall L, Mahani S, Glickman H, Goldberg R, Blake R, Slosberg R B and Hillel D. 2008. Variations in New York city's urban heat island strength over time and space. *Theoretical and Applied Climatology*, 94(1/2): 1-11 [DOI: 10.1007/s00704-007-0368-3]
- 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]

- Ji C P, Liu W D and Xuan C Y. 2006. Impact of urban growth on the heat island in Beijing. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(1): 69-77 (季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 2006. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究. *地球物理学报*, 49(1): 69-77) [DOI: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.01.010]
- Li W F, Ouyang Z Y, Chen Q W and Mao J Q. 2008. Study on the spatial pattern of impervious surface using remote sensing data within the urban area of Beijing. *Journal of Remote Sensing*, 12(4): 603-612 (李伟峰, 欧阳志云, 陈求稳, 毛劲乔. 2008. 基于遥感信息的北京硬化地表格局特征研究. *遥感学报*, 12(4): 603-612) [DOI: 10.11834/jrs.20080479]
- Lu D S and Weng Q H. 2006. Spectral mixture analysis of ASTER images for examining the relationship between urban thermal features and biophysical descriptors in Indianapolis, Indiana, USA. *Remote Sensing of Environment*, 104(2): 157-167 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.11.015]
- Mathew A, Khandelwal S and Kaul N. 2016. Spatial and temporal variations of urban heat island effect and the effect of percentage impervious surface area and elevation on land surface temperature: study of Chandigarh city, India. *Sustainable Cities and Society*, 26: 264-277 [DOI: 10.1016/j.scs.2016.06.018]
- 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*, 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]
- Qin Z H, Li W J, Xu B and Zhang W C. 2003. Estimation method of land surface emissivity for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data//The 14th National Remote Sensing Technology Academic Exchange Meeting. Qingdao, China: Chinese Society for Oceanography (覃志豪, 李文娟, 徐斌, 张万昌. 2003. 利用Landsat TM6反演地表温度所需地表辐射率参数的估计方法. 第十四届全国遥感技术学术交流会. 青岛: 中国海洋学会)
- Quattrochi D, Luvall J C, Rickman D L, Estes Jr M G, Laymon C A and Howell B F. 2000. A decision support information system for urban landscape management using thermal infrared data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(10): 1195-1207 [DOI: 10.1080/01431160050121384]
- Ridd M K. 1995. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, 16(12): 2165-2185 [DOI: 10.1080/01431169508954549]
- Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Soria G, Romaguera M, Guanter L, Moreno J, Plaza A and Martínez P. 2008. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2): 316-327 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.904834]
- Tang F and Xu H Q. 2013. Quantitative relationship between impervious surface and land surface temperature based on remote sensing technology. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(6): 1987-1996, 2017 (唐菲, 徐涵秋. 2013. 城市不透水面与地表温度定量关系的遥感分析. *吉林大学学报(地球科学版)*, 43(6): 1987-1996, 2017) [DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.2013.06.030]
- Tran H, Uchihama D, Ochi S and Yasuoka Y. 2006. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(1): 34-48 [DOI: 10.1016/j.jag.2005.05.003]
- Unger J, Gál T, Rakonczai J, Mucsi L, Szatmári J, Tobak Z, Van Leeuwen B and Fiala K. 2009. Air temperature versus surface temperature in urban environment//The seventh International Conference on Urban Climate. Yokohama, Japan
- Wang L, Meng Q Y, Wu J, Zhang J H and Zhang L L. 2015. Monitoring and analyzing spatio-temporal changes of heat island intensity in Beijing main urban construction area from 2005 to 2014. *Journal of Geo-Information Science*, 17(9): 1047-1054 (王靓, 孟庆岩, 吴俊, 张佳晖, 张琳琳. 2015. 2005—2014年北京市主要城建区热岛强度时空格局分析. *地球信息科学学报*, 17(9): 1047-1054) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2015.01047]
- Wang X K, Meng Q Y, Li J., Hu X., Zhang L., 2021. Spatiotemporal evolution and thermal environmental effects of impervious surfaces in the main urban area of Beijing. *Ecological Science*, 40(1): 169 - 181 (王宪凯, 孟庆岩, 李娟, 胡新礼, 张琳琳. 北京市主城区不透水面时空演变及其热环境效应研究. *生态科学*, 2021, 40(1): 169-181) [DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2021.01.022]
- Xian G. 2008. Satellite remotely-sensed land surface parameters and their climatic effects for three metropolitan regions. *Advances in Space Research*, 41(11): 1861-1869 [DOI: 10.1016/j.asr.2007.11.004]
- Xian G and Crane M. 2006. An analysis of urban thermal characteristics and associated land cover in Tampa Bay and Las Vegas using Landsat satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 104(2): 147-156 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.09.023]
- Xiao R B, Ouyang Z Y, Zheng H, Li W F, Schienke E W and Wang X K. 2007. Spatial pattern of impervious surfaces and their impacts on land surface temperature in Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences*, 19(2): 250-256 [DOI: 10.1016/S1001-0742(07)60041-2]
- Xu H Q. 2009. Quantitative analysis on the relationship of urban impervious surface with other components of the urban ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 29(5): 2456-2462 (徐涵秋. 2009. 城市不透水面与相关城市生态要素关系的定量分析. *生态学报*, 29(5): 2456-2462) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.05.032]
- Yang S B, Zhao X Y, Shen S H, Hai Y L and Fang Y X. 2010. Characteristics of urban heat island seasonal pattern in Beijing based on Landsat TM/ETM+ imagery. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 33(4): 427-435 (杨沈斌, 赵小艳, 申双和, 海玉龙, 方永侠. 2010. 基于Landsat TM/ETM+数据的北京城市热岛季节特征研究. *大气科学学报*, 33(4): 427-435) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-7097.2010.04.006]
- Yang Y B and Pan P. 2011. Research on the impact of impervious surface area on urban heat island in Jiangsu Province//Proceedings of the SPIE 8286 International Symposium on Lidar and Radar Mapping. Nanjing: SPIE, 82861P [DOI: 10.1117/12.912517]
- Ye Z W. 2009. Relation between neighborhood with dense high-rises and thermal landscape using remote sensing. Beijing: Capital Normal University (叶智威. 2009. 基于遥感的高层密集街区与热景观关系研究. 首都师范大学)
- Yuan F and Bauer M E. 2007. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 106(3): 375-386 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.003]

- Zhang J H, Hou Y Y, Li G C, Yan H and Yang L M. 2005. The diurnal and seasonal characteristics of urban heat island variation in Beijing city and surrounding areas and impact factors based on remote sensing satellite data. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 48(S2): 220-229 (张佳华, 侯英雨, 李贵才, 延昊, 杨立民. 2005. 北京城市及周边热岛日变化及季节特征的卫星遥感研究与影响因子分析. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 35(S1): 187-194)
- Zhang X L, Zhang S W, Li Y, Xie Y F and Kuang W H. 2008. Correlation between urban thermal environment effect and land use pattern in Changchun. *Resources Science*, 30(10): 1564-1570 (张新乐, 张树文, 李颖, 谢云峰, 匡文慧. 2008. 城市热环境与土地利用类型格局的相关性分析——以长春市为例. *资源科学*, 30(10): 1564-1570) [DOI: 10.3321/j.issn:1007-7588.2008.10.018]
- Zhang Y, Bao W J, Yu Q and Ma W C. 2012. Study on seasonal variations of the urban heat island and its interannual changes in a typical Chinese megacity. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(4): 1121-1128 (张艳, 鲍文杰, 余琦, 马蔚纯. 2012. 超大城市热岛效应的季节变化特征及其年际差异. *地球物理学报*, 55(4): 1121-1128) [DOI: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.007]
- 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*, 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 W Q, Huang G L and Cadenasso M L. 2011. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 102(1): 54-63 [DOI: 10.1016/j.landurbplan.2011.03.009]

Response relationship between urban thermal environment and impervious surface distribution density at multi-spatial scale: A case study of Beijing

MENG Qingyan^{1,2,3,4}, WANG Zi'an^{1,2,3,4}, ZHANG Linlin^{1,2,3,4}, SUN Zhenhui^{3,5},
HU Die^{1,2,3,4}, YANG Tianliang^{3,4}

1. *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Sanya Institute of Remote Sensing, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572029, China;*

4. *Aerospace Information Hainan Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572029, China;*

5. *School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China*

Abstract: In view of the insufficient research on the response law of urban thermal environment and the Impervious Surface Distribution Density (ISDD), this paper selected Beijing as a case study. On the basis of the MODIS data, the average temperature difference between the urban construction and marginal areas was calculated as the UHI intensity (UHII). In combination with the characteristics of the UHII level, six typical regions (I Xierqi, Xisanqi, Huilongguan, II Dongs, Xi'anmen, Xijiekou, III the middle of Fengtai District, IV Sihui, Dingfuzhuang, Dongba, V Shijingshan District, VI near the Sijiqing bridge on the North Fourth Ring Road) with a high expected UHII level were selected to study the response relationship between the UHII level and the ISDD. Finally, Landsat data was used to invert the surface temperature to study the critical point and optimal scale of surface temperature response to the ISDD in urban construction areas and typical regions. Results show that the following. (1) The frequency of occurrence of UHII levels, their variation degree during the day and at night have a certain correlation with the ISDD, and the variation characteristics of the UHII under similar ISDDs are the same. (2) The distribution characteristics of the surface mean temperature in urban construction areas and the ISDD are obviously consistent. As the scale radius r increases, the response is more obvious. Besides, there are critical points for the response of the surface temperature to ISDD. The response of critical points gradually increases with the decrease of scale radius r . When scale radius $r=1000$ m, the ISDD reaches 60%, and its influence tends to weaken; the critical points of $r=500$ m and $r=300$ m are 69% and 83%, respectively. (3) The optimal scales of different typical regions have differences. The optimal scale of Xierqi, Xisanqi, and Huilongguan is 150 m, and that of Dongs, Xi'anmen, Xijiekou, and Qingqiao near the fourth ring is 60 m. However, seasonal changes have little impact on the optimal scale. The optimal scale can measure the degree of fragmentation of the impervious surface distribution in different regions and the single degree of surface type to some extent. This study can provide a reference for urban planning and UHI governance.

Key words: urban heat island effect, impervious surface distribution density, urban construction area, critical point, response law

Supported by Key Science and Technology Program of Hainan Province (No. ZDKJ2017009); Science and Technology Planning Project of Sichuan Province (No. 2018JZ0054); National Key Science and Technology Project of High Resolution Earth Observation (No. 05-Y30B01-9001-19/20-1)