

基于多源卫星资料的京津唐城市群热环境研究

刘勇洪¹, 栾庆祖¹, 权维俊², 张硕¹

1. 北京市气候中心, 北京 100089; 2. 中国气象局京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089

摘要: 基于 FY-3A/B、MODIS/Aqua、NOAA18/AVHRR 等多源卫星资料, 利用地表热岛强度、热岛比例指数开展了京津唐城市群热岛时空变化分析研究, 并结合 Landsat-TM 卫星资料提取的地表参数、气候背景参数和社会经济参数等开展了地表热场的成因分析研究。研究表明: 地表热岛强度指标能有效反映京津唐城市群热岛的时空变化, 热岛强度的大小与高温强弱没有直接关系, 而且地表热岛强度只有在夜晚才与气温观测具有一致性, 即冬季最强, 夏季最弱; 而在白天则呈相反规律。热岛比例指数估算显示 2012 年京津唐城市群热岛强度排名前 3 的分布是天津市辖区 (0.86)、北京市辖区 (0.85) 和朝阳区 (0.74), 唐山市辖区也达到了 0.50。热场成因分析表明不透水盖度是城市热岛差异的最重要下垫面因子, 遥感陆表温度较现有气象观测更能显示城市热岛的空间分布, 城市热岛强弱与国民生产总值、人口数、用水量和用电量都有比较明显的线性正相关关系 (线性回归模型决定系数 R^2 分别为 0.513 1、0.485 3、0.483 6 和 0.306), 而与人为热有明显的对数正相关关系 (模型决定系数 R^2 为 0.672 3)。不透水盖度、人均用水量和年平均气温构成了城市热环境差异的主要影响因子 (模型决定系数 R^2 为 0.80), 反映了城市下垫面参数、社会经济活动和气候背景因素对城市热岛空间差异的共同影响。

关键词: 热岛强度; 热岛比例指数; 时空变化; 成因分析; 不透水盖度; 京津唐

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.07.012

中图分类号: X16

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2015) 07-1150-09

引用格式: 刘勇洪, 栾庆祖, 权维俊, 张硕. 基于多源卫星资料的京津唐城市群热环境研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1150-1158.

LIU Yonghong, LUAN Qingzu, QUAN Weijun, ZHANG Shuo. Research on Heat Environment of Beijing-Tianjin-Tangshan Urban Group Based on Multisource Satellite Data [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(7): 1150-1158.

城市热环境最明显的特征就是城市热岛效应 (Urban Heat Island effect, 简称 UHI), 是指城市中的气温明显高于城市外围郊区的现象, 是城市气候最明显的特征之一 (肖荣波等, 2005)。城市热岛降低了人们生活的舒适度并加剧了大气污染, 严重影响了居民生活质量, 如何定量地监测城市热环境的动态变化及开展热环境成因分析已成为当前城市热岛研究的重要内容。目前, 常用的城市热岛研究手段有 3 种: 气象观测、数值模拟和卫星遥感。气象观测由于具有观测资料时效长、定点、准确、定量的优势, 一直被作为基础手段用于研究城市热岛的时空演变规律 (张光智等, 2002; 季崇萍等, 2006; Liu et al., 2007; 郭勇等, 2006; 谢庄等, 2006)。张尚印等 (2006) 利用长时间序列气温资料开展了北京地区 40 年北京地区强热岛事件分析, 郑祚芳等 (2006) 应用自动气象站逐时气温观测资料分析了北京城市热岛的时空分布特征, 马玉霞等 (2009) 分析了兰州城市近 50 年的热岛变化。数值模拟由于能深入研究城市热岛现象和成因之间的

物理本质, 在经历了一维、二维、三维的发展后, 对热岛形成机制方面的研究也日趋成熟和普遍。杨玉华等 (2003) 利用 MM5 数值模式模拟表明考虑人为热源能对北京城市热岛及环流有更好的模拟, 江晓燕等 (2007) 利用 WRF (天气预报模式) 成功模拟了北京热岛日变化趋势, 江学顶等 (2006) 利用 MM5 数值模式对广州的研究表明数值模拟结合“3S”技术能更好地研究热岛空间格局的动态变化。近年来, 卫星遥感已成为普遍用于城市热岛研究的一种重要手段。通过遥感不但能开展城市热岛时间变化的研究, 还能开展空间结构等细节特征变化研究。丁金才等 (2002)、方永侠等 (2011) 利用热红外遥感资料开展了上海、北京城市热岛的研究, 陈云浩等 (2002)、苏伟忠等 (2005) 和宋艳墩等 (2007) 利用热红外遥感资料分别开展了上海、南京、深圳的空间格局分析研究。刘勇洪等 (2014) 进一步结合气象资料与多种卫星资料开展了北京热岛的定量评估研究。但上述研究多集中在一个单一的城市, 对城市群热岛的空间格局定量监测及成

基金项目: 高分气象遥感应用示范系统 (一期); 风云三号气象卫星应用示范系统工程; 北京市气象局“城市气候评估”创新团队

作者简介: 刘勇洪 (1974 年生), 男, 教授级高工, 硕士, 主要从事卫星遥感与应用气象等的研究。E-mail: lyh7414@163.com

收稿日期: 2015-03-18

因研究较少。在热岛形成机制方面, Yamashita et al. (1986) 对日本东京的研究指出城市天空可视度可作为衡量城市化对城市热岛影响的重要因子。Morris et al. (2001) 则指出云量增多和风速增加会降低城市热岛, Mohsin et al. (2012) 对加拿大多伦多城市的研究指出人为热、地形条件以及气象站的选取影响城市热岛大小。佟华等 (2005) 利用三维数值模式对北京城市的模拟研究表明大型楔形绿地能有效减轻城市热岛。甘霖 (2011) 则指出合理的城市规划布局是减少城市热岛的重要途径, 徐永明等 (2013) 指出城市不透水盖度是城市热环境的重要指示因子。可见气象因素、城市下垫面和社会经济因素都是影响城市热环境的重要因素。

京津唐城市群是我国继珠江三角洲和长江三角洲之后又一经济快速发展的地区, 区域内众多城市的协同发展和规划布局对城市热岛的形成、减缓具有重要作用, 本文采用多种卫星资料引入定量热岛监测指标开展京津唐城市群的热岛监测, 并结合气候背景因素、城市下垫面和社会经济因素分析该地区的热岛形成机制, 对京津唐城市发展一体化和协调发展具有重要参考意义。

1 资料与方法

1.1 资料

1.1.1 气象资料

京津唐地区 47 个气象台站的 2012 年逐月平均气温和 0 cm 地温资料, 来源于北京市气象信息中心。

1.1.2 社会经济资料

京津唐地区 40 个区县 2012 年左右的社会经济数据, 主要包括 GDP、人口数、用水量、用电量、人为热等, 来源于当地统计局发布的社会统计资料。

1.1.3 卫星遥感资料

(1) FY-3A/B 卫星资料: 京津唐地区 2012 年 8 月 22 日 (非高温日, 日最高气温未超过 30 °C)、2013 年 7 月 24 日 (高温日, 日最高气温达 38 °C) FY-3A/B 白天和夜晚 LST 产品, 来源于国家卫星气象中心的风云卫星遥感数据服务网 (<http://fy3.satellite.cma.gov.cn/portalsite/default.aspx>)。

(2) MODIS 卫星资料: 京津唐地区 2012 年全年 MODIS/Aqua 白天和夜晚 8 天合成 LST 产品 (MYD11A2), 2012 年 8 月 22 日、2013 年 7 月 24 日 MODIS/Aqua 白天 LST 产品 (MYD11_L2), 来源于美国国家航空与航天局陆表数据中心网站 (https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool)。

(3) NOAA 卫星资料: 2012 年 8 月 22 日、2013 年 7 月 24 日 NOAA18/AVHRR 1B 数据, 来源于北京市气候中心。

(4) Landsat-TM 卫星资料: 2011 年 7 月 26 日

北京地区和 2009 年 8 月 30 日天津、唐山地区 Landsat-TM5 L1 级资料, 来源于中国科学院遥感与数字地球研究所的“对地观测数据共享计划” (<http://ids.ceode.ac.cn/>)。

1.2 研究方法

1.2.1 土地利用分类

利用京津唐地区的 Landsat-TM5 高分辨率卫星影像资料, 采用最大似然法和阈值法, 开展耕地、林地、水域、城镇用地、绿地和未利用地等 6 类别的土地利用类型划分。

对 2011 年 7 月 26 日北京地区 Landsat-TM5 遥感图像经过辐射定标后得到 6 个可见光反射率波段影像, 在此基础上进行最大似然监督分类。训练样本来自 2010 年北京 1:10 000 土地利用信息和 2005—2010 年北京市气候中心农业气象室野外不同类型 (林地、农田、绿地、城镇用地、未利用地和水体) 等 GPS 调查资料, 每类至少 100 个样本以上, 分类波段包括了 TM 6 个可见光反射率波段、高程 DEM 和坡度等 8 个波段资料, 根据图象划分成 2 种林地类型、1 种山区裸地、2 种平原裸地、2 种农田、1 种绿地、水体、山区阴影等类别, 分完后再进行归并, 再对一些错分明显的类别主要是建筑、农田、绿地等进行目视人工解译修正。监督分类结果常常有细碎图斑, 需要对获得的分类结果进行一些后处理工作, 本研究使用 ENVI 软件中的聚类统计 (Clump)、过滤分析 (Sieve)、去除分析 (Eliminate) 功能突出这些图斑并进行了小图斑的合并。最后, 得到较为理想的分类结果, 精度检验表明各期的总体分类精度均在 90% 以上。类似于上述方法, 对 2009 年 8 月 30 日的 Landsat-TM 卫星资料开展了天津与河北唐山 25 m 空间分辨率的土地利用分类, 最后对北京、天津和唐山地区两景土地利用类型影像数据经过几何校正和图像镶嵌后得到京津冀地区土地利用类型分布, 如图 1 (a) 所示: 京津唐城市群城镇用地主要分布于北京城区、天津城区、唐山市区和各郊区县城, 环渤海边也有大量的城镇工业用地, 农田主要集中于平原等, 林地主要分布于北京山区和唐山北部山区等。

1.2.2 不透水盖度和植被覆盖度估算

应用线性光谱混合模型 (Linear Spectral Mixture Model, LSMM) 可有效提取城市不透水盖度 ISC (Impervious Surface Cover) 和植被覆盖度 VC (Vegetation Cover) (赵英时等, 2003)。该方法认为像元由多种基本组分 (端元) 的混合, 像元光谱值是以端元在像元内的面积比例为权重系数的端元光谱值的线性组合。像元中各个组分的面积比例可以通过最小二乘法求解, 基本思路是使得

误差最小。Ridd (1995) 认为城市景观除水体外, 主要由植被、土壤、不透水表面 3 种典型覆被景观组成, 可以构成一个典型的植被-不透水表面-土壤景观组分模型, 即 V-I-S 模型。将 V-I-S 模型与 LSMM 模型相结合已成为近年来估算城市地表各组分覆盖度的常用方法。依照 V-I-S 模型的思想, 选取植被、土壤、不透水面作为构成混合像元的端元, 端元光谱特征的确定是光谱线性分解关键。首先对遥感影像进行最小噪声分离变换 (Minimum Noise Fraction, MNF) 以减少数据冗余和波段之间的相关性, 然后通过像元纯净度 PPI (Pixel Purity Index) 计算和 N 维散度分析提高植被、土壤、不透水面端元光谱特征的精度。依据选取的 3 种端元光谱对 TM 影像进行光谱线性分解, 求出的不透水表面的面积比例即为不透水面盖度 ISC, 求出的植被面积比例即为植被覆盖度。

运用上述方法及 Landsat-TM 影像估算的京津唐地区不透水盖度 ISC 和植被覆盖度 VC 如图 1(b) 和图 1(c) 所示。可以看出, 与土地利用类型图相对应, 城镇地区一般都是 ISC 的高值区和 VC 的低值区, 但在北京城区、天津城区和唐山城区周边均存在 ISC 高值范围小于 VC 低值范围现象。例如北京六环内的 ISC 高值范围 ($\geq 70\%$, 约占 38.9%) 明显小于 VC 低值范围 ($\leq 30\%$, 约占 47.9%), 这是由于中心城区向郊区农田的过渡区域存在着较多的裸地和未利用地, 虽然裸地和未利用地 VC 较低, 但并不是不透水面, 因此 ISC 处于低值。

1.2.3 地表温度反演

针对 FY-3A/B 和 MODIS 卫星资料, 直接采用免费下载获取的陆表温度 (Land Surface Temperature, LST) 产品。NOAA18/AVHRR 1B 卫星地表温度的生成则采用 Quan et al. (2012) 提出的改进型的 Becker 分裂窗方法, 该地表温度反演结果与国际上广泛应用的 MODIS 地表温度产品具有

较好的一致性。Landsat-TM 地表温度反演采用 Jiménez-Muñoz et al. (2003) 提出的单通道算法反演地表温度, 具体反演过程见文献中的 Landsat-TM 地表温度反演 (Sobrino et al., 2004; 徐永明等, 2013)。

1.2.4 地表热岛强度计算

基于卫星遥感观测的热岛可以称之为地表城市热岛 (SUHI, Surface Urban Heat Island)。在这里, 采用国际上通用的城乡二分法, 应用叶彩华等 (2011) 提出的地表热岛强度指标的计算方法来估算城市地表热岛强度, 即:

$$UHII_i = T_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_{crop} \quad (1)$$

其中, $UHII_i$ 为图象上第 i 个象元所对应的热岛强度, T_i 是陆表温度 LST, n 为郊区农田内的有效象元数, T_{crop} 为郊区农田内的地表温度。

其中, 郊区农田背景区的选择及其代表性对地表热岛强度的估算结果影响很大。根据城市热岛的定义, 郊区农田背景区一般在城市周边地区进行选择, 由于城市群面积广阔, 不能用同一个郊区背景值来计算各城市热岛强度, 需要对北京、天津、唐山分别选择郊区农田背景区, 在 1 km 分辨率影像上大部分像元是混合像元, 在这里遵循以下条件来选取像元纯度高的郊区农田背景区: (1) 平原农田地区, 与城市海拔差小于 50 m; (2) 植被覆盖度 $\geq 70\%$; (3) 不透水盖度 $\leq 30\%$ 。

由此根据京津唐地区的土地利用类型、植被覆盖度、不透水盖度和地形图就可选出郊区农田, 如图 2 为京津唐地区郊区农田背景区的分布: 在 1 km 尺度上, 由于郊区农田主要为混合像元, 北京纯的农田像元较少, 而天津和唐山相对较多。为更好地比较京津唐城市群主要城市之间的城市热岛大小, 分别选取北京市辖区 (东城和西城)、天津市辖区和唐山市辖区 (如图 2 所示) 进行该区域内平均地

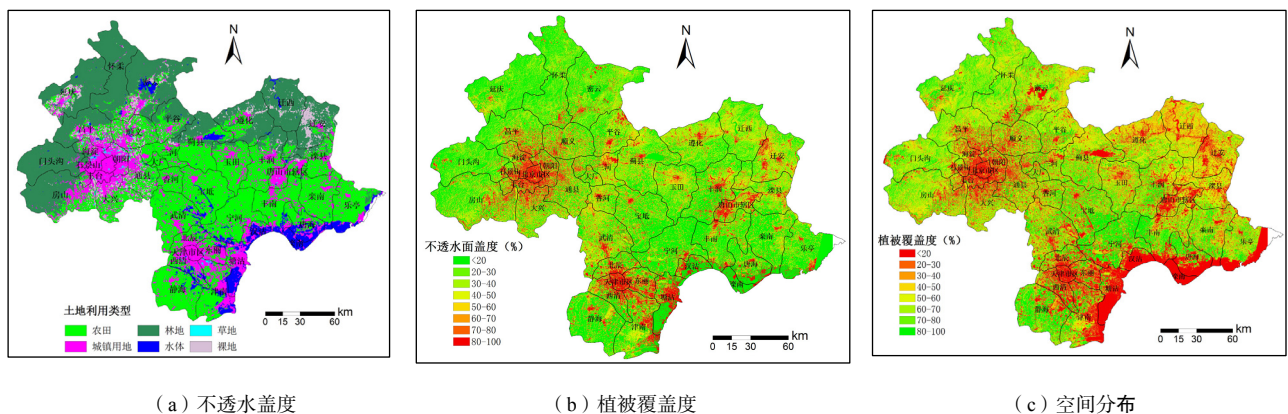


图 1 京津唐地区土地利用类型
Fig. 1 Spatial distribution of landuse types

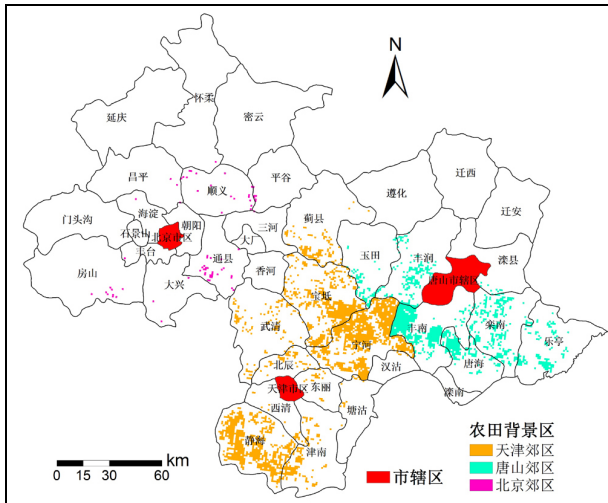


图2 京津唐地区郊区农田背景的选择及市辖区分布

Fig. 2 Selection of rural crops and location of municipal districts of Beijing-Tianjin-Tangshan area

表温度计算, 然后根据式(1)计算该区域平均地表温度与郊区背景农田平均地表温度的距平, 即为该市辖区热岛强度值。

按照叶彩华等(2011)文中的地表热岛强度等级划分, 可划分为7级热岛强度: 强冷岛、较强冷

岛、弱冷岛、无热岛、弱热岛、较强热岛和强热岛等, 分别赋值为1、2、3、4、5、6和7。

1.2.5 城市热岛比例指数

在这里, 采用叶彩华等(2011)提出的地表热岛比例指数(Urban Heat Island Proportion Index, UHPI)的计算方法来定量估算城市空间单元内的地表热岛强度, 可以定量反映城市热岛的时空差异。

$$UHPI = \frac{1}{100m} \sum_i^n w_i p_i \quad (2)$$

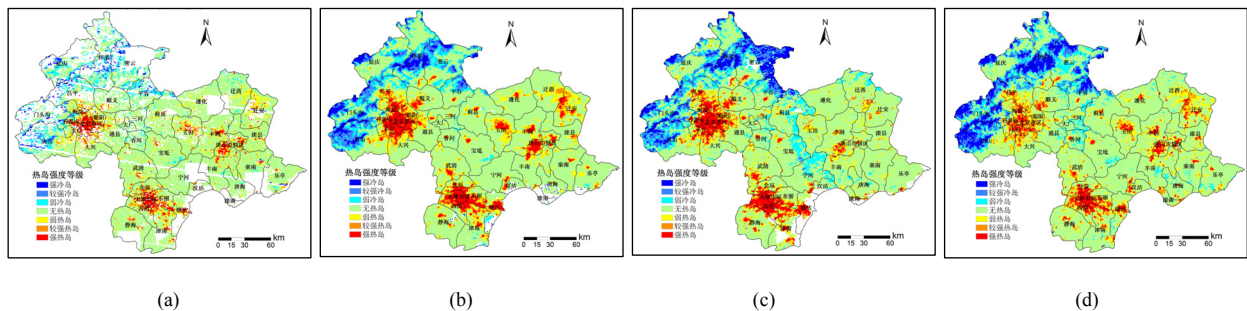
式中UHPI为城市热岛比例指数; m 为热岛强度等级数; i 为城区温度高于郊区温度等级序号; n 为城区温度高于郊区温度的等级数; w_i 为第 i 级的权重, 取等级值, p_i 为第 i 级所占的面积百分比。UHPI值在0~1.0之间, 该值越大, 热岛现象越严重。其值为0时, 表明此地没有热岛现象, 值为1时, 表明此地均处于强热岛范围。由前面定义的热岛强度等级可知, $m=7, n=3$ 。

2 结果与分析

2.1 热岛监测

2.1.1 日变化监测

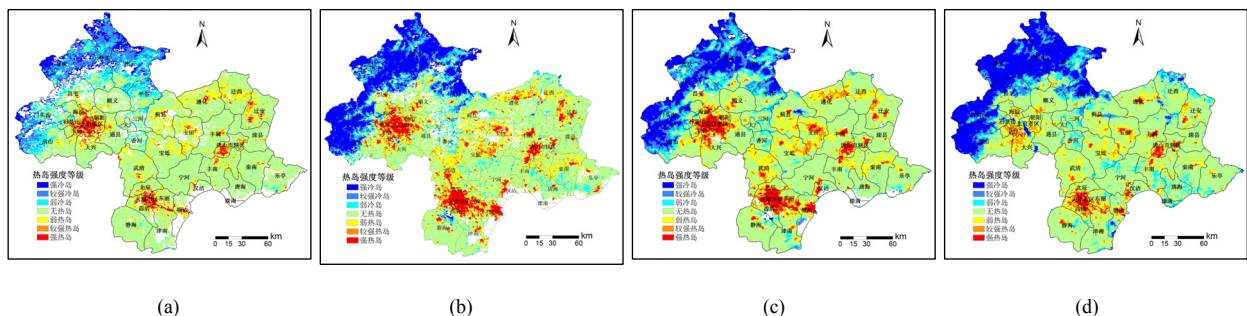
图3和图4分别为京津唐城市群2012年8月22日(非高温日)和2013年7月24日(高温日)



(a) FY-3A 12:06; (b) MODIS/Aqua 13:30; (c) FY-3B 13:50; (d) NOAA18 14:28
(a) FY-3A 4:06 GMT; (b) MODIS/Aqua 5:30 GMT; (c) FY-3B 5:50 GMT; (d) NOAA18 6:28 GMT

图3 京津唐地区2012年8月22日不同卫星估算的热岛强度

Fig. 3 UHII in Beijing-Tianjin-Tangshan area for different satellite on Aug. 22, 2012



(a) FY-3A 11:40; (b) FY-3B 13:30; (c) MODIS/Aqua 13:30; (d) NOAA18 14:38
(a) FY-3A 3:40 GMT; (b) FY-3B 5:30 GMT; (c) MODIS/Aqua 5:30 GMT; (d) NOAA18 6:38 GMT

图4 京津唐地区2013年7月24日不同卫星估算的热岛强度

Fig. 4 UHII in Beijing-Tianjin-Tangshan area for different satellite on Jul. 24, 2013

白天不同卫星 (FY-3A、MODIS/Aqua、FY-3B 和 NOAA18) 按时间顺序估算的热岛强度图。可以看出, 不同卫星监测的热岛强度大小和范围在空间分布上具有较好的一致性, 不管是高温日还是非高温日, 在不同时刻京津唐城市群的城镇地区均存在明显的热岛效应, 主要集中在北京城区、天津城区、唐山市区和各郊区县城, 而城镇周边大部分平原农田地区均处于“无热岛”区, 北京山区存在冷岛效应。而在时间分布上热岛强度一般在午后达到最大, 如 2012 年 8 月 22 日中午 MODIS/Aqua 的 13:30 和 FY-3B 和 13:50 的热岛强度大小和范围明显大于上午 FY-3A 12:06 和下午 NOAA18 14:28 的热岛强度, 2013 年年 7 月 24 日中午 MODIS/Aqua 和 FY-3B 的 13:30 热岛强度大小和范围明显大于上午 FY-3A 11:40 和下午 NOAA18 14:38 的热岛强度。

对北京市辖区、天津市辖区、唐山市区不同时刻估算的热岛强度 UHII 如表 1 所示: 2012 年 8 月 22 日和 2013 年 7 月 24 日不同时刻的热岛强度均为天津市辖区>北京市辖区>唐山市辖区, 且在午后

13:00—14:00 之间热岛强度为一高峰值。此外, 就同一 (或邻近) 时刻而言, 2012 年 8 月 22 日 (非高温日) 的 UHII 大于 2013 年 7 月 24 日 (高温日) 的 UHII, 显示热岛强度的大小很可能与气温的高低没有直接关系, 高温天气下并不一定有高的热岛强度, 这与 Nina et al. (2011) 的研究结论类似。

2.1.2 季节变化监测

图 5 和图 6 分别为利用 MODIS/Aqua 数据估算的京津唐地区 2012 年四季平均白天和夜晚热岛强度。可以看出: 白天热岛有明显季节变化, 夏季最强, 冬季最弱, 夏季白天在北京、天津、唐山市区及各郊区县城均出现明显较强以上等级热岛, 而在冬季却出现无热岛甚至是冷岛现象, 山区一般出现冷岛现象, 季节变化上符合遥感监测夏季白天最强、冬季最弱的规律 (王建凯等, 2007; Imhoff et al., 2010; Nina et al., 2011)。夜晚热岛与白天变化规律相反, 冬季最强, 夏季最弱, 平原地区大部为无热岛现象, 山区一般出现冷岛现象, 而在北京、天津、唐山市区及各郊区县城出现热岛现象, 环渤海

表 1 北京市辖区、天津市辖区、唐山市区不同卫星估算的热岛强度值

Table 1 UHII of Beijing municipal districts, Tianjin municipal districts and Tangshan downtown for different satellites °C

日期	2012-08-22				2013-07-24			
卫星过境时间	FY-3A 12:06	MODIS/Aqua 13:30	FY-3B 13:50	NOAA18 14:28	FY-3A 11:40	FY-3B 13:30	MODIS/Aqua 13:30	NOAA18 14:38
北京市辖区	7.8	9.1	9.7	6.0	7.1	8.2	7.1	-
天津市辖区	8.8	10.9	8.7	8.4	7.4	10.7	8.4	7.2
唐山市区	3.9	5.3	2.1	4.2	3.5	4.1	4.2	3.2

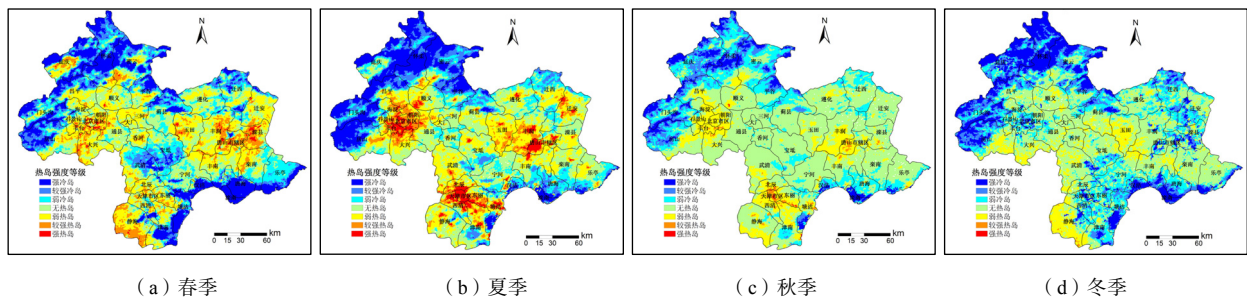


图 5 京津唐地区 2012 年四季白天平均热岛强度

Fig. 5 Seasonal mean UHII of day in Beijing-Tianjin-Tangshan area in 2012

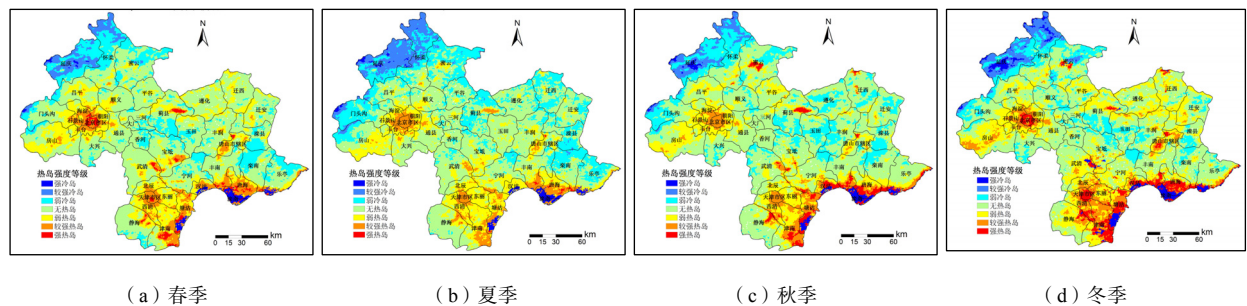


图 6 京津唐地区 2012 年四季夜晚平均热岛强度

Fig. 6 Seasonal mean UHII of night in Beijing-Tianjin-Tangshan area in 2012

边由于水体众多, 水体由于热容量大的特性在夜间相对周边地区是一个热源, 因此呈现热岛现象。这与北京市气象局气候资料室(1992)及谢庄等(2006)利用气温资料对北京地区的研究结论相似: 即冬季热岛最强, 夏季最弱。即对城市热岛监测而言, 遥感监测只有在夜晚才与气温监测具有一致性。

2.1.3 热岛定量监测

如图7所示为利用MODIS/Aqua数据估算的从高到低排列的2012年京津唐地区各城市热岛比例指数UHPI, 可以看出热岛比例指数排名前3位的分别是天津市辖区(0.86)、北京市辖区(0.85)和朝阳区(0.74), 唐山市区也达到了0.50, 而北京的丰台、石景山和天津的东丽、西清也普遍较高, UHPI在0.50以上, 说明这些城市热岛较为严重。而北京的延庆、密云、天津的蓟县、河北的大厂和迁西等城市UHPI均在0.01以下, 说明这些城市热岛现象非常轻微。

2.2 地表热场成因分析

2.2.1 城市地表参数分析

利用2011年7月26日Landsat-TM反演得到的地表温度LST、不透水盖度ISC、植被盖度VC、土壤盖度SC相关分析表明, LST与VC和ISC的相关系数*r*分别为-0.771和0.710, 而VC和ISC相关系数*r*高达-0.938。利用逐步回归方法建立的LST与ISC、VC、SC的回归关系式如下所示, 并分析了各参数对LST变化的重要性β值:

$$LST=30.282+8.733ISC+12.56SC+0.703VC$$

$$n=25\ 071 \quad (3)$$

$$r^2=0.625, F=13\ 910.578, P<0.001, \beta_{ISC}=0.757, \beta_{SC}=0.368, \beta_{VC}=0.065.$$

从上式可知, 尽管VC与LST的相关系数*r*(-0.771)高于ISC与LST的相关系数*r*(0.710), 但ISC对热场差异的重要性(0.757)却明显高于土壤(0.368)和植被参数(0.065), 表明不透水盖度ISC是城市地表热场差异形成的最重要因子。另

外, 经*F*检验, 该模型达到极显著性水平($P<0.001$), 但模型VC的回归系数为正值(0.703), 这与VC与LST存在明显负相关关系*r*(-0.771)相矛盾, 对该回归模型进行多重共线性检验表明自变量之间存在着严重的共线性关系(方差膨胀因子VIF高达39), 考虑VC的重要性远小于ISC, 因此剔除VC后对回归式订正后为:

$$LST=30.978+8.034ISC+11.877SC$$

$$n=25\ 071 \quad (4)$$

$$r^2=0.625, F=20\ 856.915, P<0.001, \beta_{ISC}=0.696, \beta_{SC}=0.348.$$

经*F*检验, 该模型达到极显著性水平($P<0.001$), 表明不透水盖度ISC的重要性仍最高, 由ISC和SC能解释62.5%的地表温度LST变化。

利用京津唐地区40个区县的热岛比例指数UHPI与不透水盖度ISC的统计回归关系式如表2所示: ISC与UHPI具有明显的线性相关关系, 能解释70.2%的热岛比例指数变化。而对各市辖区的平均不透水盖度估算表明, 天津市辖区(0.87)>北京市辖区(0.82)>唐山市辖区(0.54), 这也是前面为何天津市辖区>北京市辖区>唐山市区热岛的重要原因。

2.2.2 气候背景与社会经济因素分析

如图8为京津唐地区2012年1 km空间分辨率平均遥感陆表温度、年平均气温和年平均0 cm地温分布图: 遥感陆表温度较平均气温和0 cm地温更能显示城市热岛效应的空间分布, 而气象观测由于只选取了常规观测站, 城市代表观测站点稀少, 部分城市热岛效应并不明显。

利用47个常规气象台站的年平均气温、0 cm地温和遥感陆表温度开展相关分析表明: 遥感陆表温度LST与年平均气温Ta和0 cm地温T₀有明显线性正相关关系, 如表2所示: Ta与LST的相关性($r^2=0.7296$)大于T₀与LST温度相关性($r^2=0.6298$), 这是由于在1 km尺度上, 遥感观测

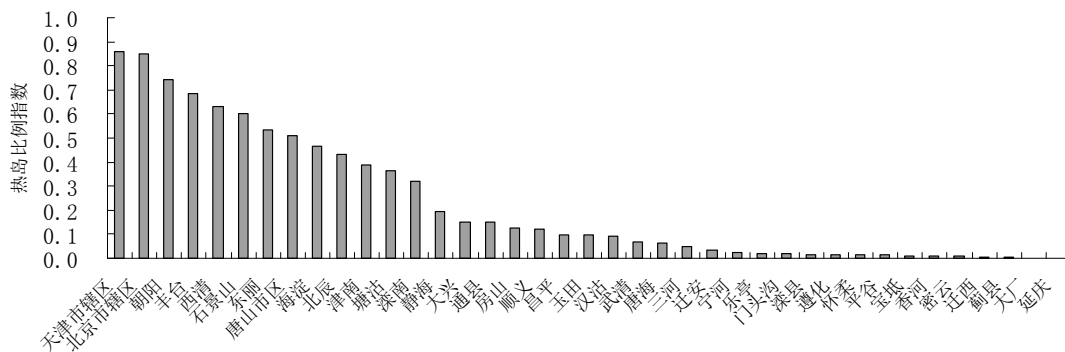


图7 京津唐地区各城市2012年热岛比例指数计算

Fig. 7 UHPI of different countries in Beijing-Tianjin-Tangshan area in 2012

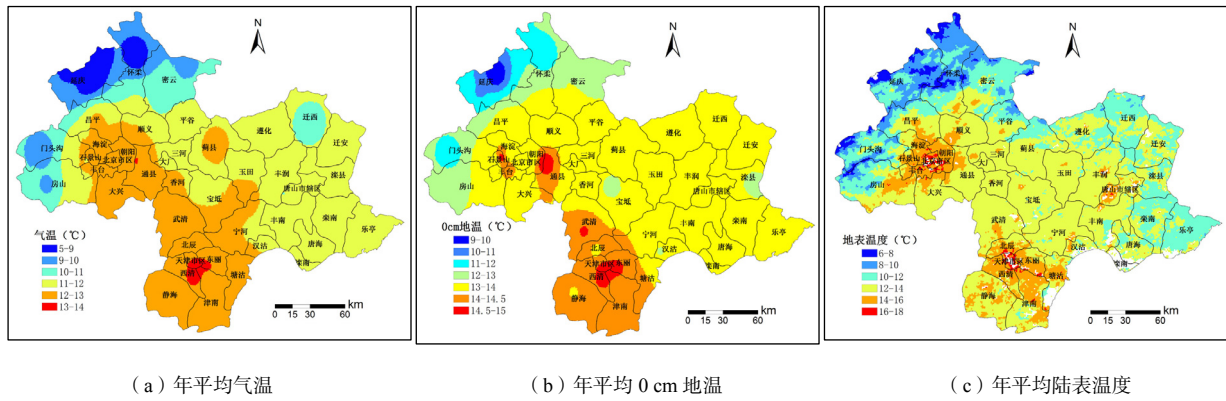


图 8 2012 年京津唐地区热环境特征空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of heat environment characteristic in Beijing-Tianjin-Tangshan area in 2012

表 2 京津唐城市群 2012 年热环境与不同因子的回归关系式

Table 2 Regression relation equations of heat environment factor and different factors for Beijing-Tianjin-Tangshan area in 2012

因变量	自变量	回归关系式	决定系数 R^2	样本数 n
热岛比例指数UHPI	不透水盖度ISC	$UHPI=1.4487ISC-0.3475$	0.7021	40
年平均陆表温度LST/°C	年平均气温Ta/°C	$LST=0.8398Ta+4.1019$	0.7296	47
年平均陆表温度LST/°C	年平均0 cm地温 T_0 /°C	$LST=1.0682T_0-0.5078$	0.6298	47
年平均0 cm地温 T_0 /°C	年平均气温Ta/°C	$T_0=0.6819Ta+5.5133$	0.8766	47
热岛比例指数UHPI	国民生产总值GDP/(万元)	$UHPI=3 \times 10^{-8}GDP+0.1738$	0.5131	40
热岛比例指数UHPI	人口数P (万人)	$UHPI=0.0002P+0.1256$	0.4853	40
热岛比例指数UHPI	总用水量W/t	$UHPI=0.1W+0.1315$	0.4836	40
热岛比例指数UHPI	总用电量E/(千瓦时)	$UHPI=1.0 \times 10^{-3}E+0.1906$	0.306	40
热岛比例指数UHPI	人为热H/(瓦/平方米)	$UHPI=0.1631 \times \ln(H)+0.0318$	0.6723	40
热岛比例指数UHPI	不透水盖度ISC, 人均用水量 W_m /t, 年平均气温Ta/°C	$UHPI=-1.024+0.8542ISC+0.00276W_m+0.058Ta$	0.785	40

的大部分像元是混合像元，对于非均匀下垫面，不同像元内的组分组成是不同的，而气象观测的地温 0 cm 只是 $2 \times 4 \text{ m}^2$ 面积大小的局部裸露土壤表面温度，因此二者观测值差异很大，而在这个尺度上通过地表长波辐射加热空气而获得的气温能更好地反映混合像元热场状况。该结果表明在区域范围内，气温在很大程度上反映了遥感地表热场的空间分布。

对京津唐地区 40 个区县 2012 年的社会经济数据 (国民生产总值 GDP、人口数、用水量、用电量、人为热) 与各区县反映热岛强弱的热岛比例指数指标统计回归分析如表 2 所示: 京津唐城市群各区县热岛比例指数与 GDP、人口数、用水量、用电量、人为热都有比较明显的正相关关系, 模型决定系数 R^2 分别为 0.5131、0.4853、0.4836、0.306 和 0.6723, 其中人为热和国民生产总值 GDP 与城市热岛比例指数的相关性最高, 表明城市人类活动和社会经济发展程度是影响城市热岛的一个重要原因。

2.2.3 综合因素分析

以京津唐地区 40 个区县的热岛比例指为因变量, 根据前面的相关分析, 选取各区县的不透水盖

度、年平均气温、人为热、常住人口、人口密度、行政区域面积、国民生产总值、总用电量、总用水量、人均 GDP、地均 GDP、人均用电量、人均用水量等 13 个因子作为自变量, 应用逐步回归方法, 考虑排除自变量之间的共线性关系, 建立了城市热岛比例指数与多个因子的综合回归关系式, 如表 2 所示: 热岛比例指数主要与不透水盖度 ISC、人均用水量 W_m 和年平均气温 Ta 密切相关, 决定系数 R^2 达到 0.785。其中第一项反映了城市下垫面参数的影响, 第二项反映了社会经济活动的影响, 第三项反映了气候背景因素的影响。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于多种卫星资料, 利用城市地表热岛和热岛比例指数等监测指标开展了京津唐城市群的城市热岛时空变化监测分析, 并结合地表参数、气候背景参数、社会经济参数等开展了地表热场的成因分析研究。研究结果表明: (1) 现有的不同卫星 FY-3A/B、MODIS/Aqua、NOAA18/AVHRR 均能有效监测京津唐城市群热岛的时空变化, 遥感监测显示白天与夜晚热岛具有不同的季节变化规律,

而夜晚的热岛监测结果具有与气温观测结果的一致性; (2) 2012 年排名前三的热岛城市分别为天津市辖区、北京市辖区和朝阳区; (3) 对地表参数的分析表明不透水盖度是地表热场差异形成的最重要下垫面因子; (4) 在区域尺度上由于城市气象站的缺乏, 遥感陆表温度较气象观测更能显示城市热岛效应的空间分布; (5) 社会经济参数 GDP、人口数、用水量和用电量与城市热岛都有明显的正相关关系, 反映了人类社会活动对城市热岛形成的重要影响, 综合分析则表明城市热岛受城市下垫面、人类活动和气候背景的共同影响。

3.2 讨论

如何定量地描述一个城市热岛的强弱, 不管是气象观测手段还是遥感手段, 还没有统一的标准和方法, 例如本文利用遥感手段研究白天城市热岛得到与气温不一致的规律, 这是由于两者观测的机理还不一样, 如何实现两种手段监测城市热岛的统一是今后气象学家和遥感学家面临的问题。另外本文使用的遥感监测方法和等级划分虽然在京津唐城市群地区进行了有效应用, 但南北气候差异明显, 不同城市下垫面背景类型和气候环流背景差异大, 是否用于其它地区还需进一步的研究。城市热岛形成的机制很复杂, 本文只是从宏观角度上简单地用统计回归的方法来描述不同因素对城市热岛差异的可能影响, 但并没有从机理上去解释各种因素对热岛的具体影响过程, 因此通过卫星遥感获取精细化地表参数, 融合数值模式和能量平衡模型, 结合实地试验观测数据来研究城市热岛的形成机制是未来的重要研究方向, 这必将对城市的热岛效应有深入理解, 促进各城市采取有力措施以减缓城市热岛效应给自然环境、区域气候造成的负面影响。

致谢: 感谢本文审稿者提出的许多宝贵意见。

参考文献:

IMHOFF M L, ZHANG P, WOLFE R E, et al. 2010. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA [J]. *Remote Sensing of Environment*, 114(3): 504-513.

JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, SOBRINO J A. 2003. A generalized single channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 108(D22): 4688-4695.

LIU W, JI C, ZHONG X, et al. 2007. Temporal characteristics of the Beijing urban heat island [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 87(1-4): 213-221.

MOHSIN T, GOUGH W A. 2012. Characterization and estimation of urban heat island at Toronto: impact of the choice of rural sites [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 108(1-2): 105-117.

MORRIS C J G, SIMMONDS I, PLUMMER N. 2001. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 40(2): 169-182.

NINA S, SVEN L, RALF S. 2011. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures [J]. *Remote Sensing Environment*, 115(12): 3175-3186.

QUAN W J, CHEN H B, HAN X Z, et al. 2012. A Modified Becker's Split-Window Approach for Retrieving Land Surface Temperature from AVHRR and VIRR [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 26(2): 229-240.

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 [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 16(2): 2165-2185.

SOBRINO J A, JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, PAOLINI L. 2004. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 90(4): 434-440.

YAMASHITA S, SEKINE K, SHODA M, et al. 1986. On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama River basin, Japan [J]. *Atmospheric Environment*, 20(4): 681-686.

北京市气象局气候资料室. 1992 北京城市气候[M]. 北京: 气象出版社: 2-7.

陈云浩, 史培军, 李晓兵. 2002. 基于遥感和 GIS 的上海城市空间热环境研究[J]. *测绘学报*, 31(2): 139-144.

丁金才, 张志凯, 奚红, 等. 2002. 上海地区盛夏高温分布和热岛效应的初步研究[J]. *大气科学*, 26(3): 412-420.

方永侠, 申双和, 韩莹, 等. 2011. 基于 TM 影像的不同季节北京城市热环境研究[J]. *气候与环境研究*, 16(4): 487-493.

甘霖. 2011. 基于遥感影像的北京城市热岛时空演变及其影响因素分析(1992—2008)[J]. *北京规划建设*, (3): 78-83.

郭勇, 龙步菊, 刘伟东, 等. 2006. 北京城市热岛效应的流动观测和初步研究[J]. *气象科技*, 34(6): 656-661.

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[J]. *地球物理学报*, 49(1): 69-77.

江晓燕, 张朝林, 高华, 等. 2007. 城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响—一个例分析[J]. *气象学报*, 65(2): 301-307.

江学顶, 夏北成, 郭涿, 等. 2006. 数值模拟与遥感反演的广州城市热岛空间格局比较[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 45(6): 116-120.

刘勇洪, 徐永明, 马京津, 等. 2014. 北京城市热岛的定量监测及规划模拟研究[J]. *生态环境学报*, 23(7): 1156-1163.

马玉霞, 王武功, 魏海茹. 2009. 兰州市近 50 年城市热岛强度变化特征[J]. *气象科技*, 37(6): 660-664.

宋艳敏, 余世孝, 李楠. 2007. 深圳特区表面温度空间分异特征[J]. *生态学报*, 27(4): 1489-1498.

苏伟忠, 杨英宝, 杨桂山. 2005. 南京市热场分布特征及其与土地利用覆被关系研究[J]. *地理科学*, 25(6): 697-703.

佟华, 刘辉志, 李延明, 等. 2005. 北京夏季城市热岛现状及楔形绿地规划对缓解城市热岛的作用[J]. *应用气象学报*, 16(3): 357-366.

王建凯, 王开存, 王普才. 2007. 基于 MODIS 地表温度产品的北京城市热岛(冷岛)强度分析[J]. *遥感学报*, 11(3): 330-339.

肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 等. 2005. 城市热岛的生态环境效应[J]. *生态学报*, 25(8): 2055-2060.

谢庄, 崔继良, 陈大刚, 等. 2006. 北京城市热岛效应的昼夜变化特征分析[J]. *气候与环境研究*, 11(1): 69-75.

徐永明, 刘勇洪. 2013. 基于 TM 影像的北京市热环境及其与不透水面的关系研究[J]. *生态环境学报*, 22(4): 639-643.

杨玉华, 徐祥德, 翁永辉, 等. 2003. 北京城市边界层热岛的日变化周期模拟[J]. *应用气象学报*, 14(1): 61-68.

叶彩华, 刘勇洪, 刘伟东, 等. 2011. 城市地表热环境遥感监测指标研究及应用[J]. *气象科技*, 39(1): 95-101.

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): 43-50.

张尚印, 徐祥德, 刘长友. 2006. 近40年北京地区强热岛事件初步分析 [J]. 高原气象, 25(6): 1147-1152.
赵英时, 等. 2003. 遥感应用分析原理与方法[M]. 科学出版社: 北京:

330-334.

郑祚芳, 刘伟东, 王迎春, 等. 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.

Research on Heat Environment of Beijing-Tianjin-Tangshan Urban Group Based on Multisource Satellite Data

LIU Yonghong¹, LUAN Qingzu¹, QUAN Weijun², ZHANG Shuo

1. Beijing Municipal Climate Center, Beijing 100089, China;

2. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, CMA, Beijing 100089, China

Abstract: Based on FY-3A/B, MODIS/Aqua and NOAA18/AVHRR satellite data, using urban surface heat island intensity (UHII) and urban heat island proportion index (UHPI), the temporal and spatial variation of urban heat island for Beijing-Tianjin-Tangshan urban group region is monitored and analysed. And combined with land surface parameters such as vegetation cover and impervious surface cover by Landsat-TM satellite data, climate background factors such as mean air temperature and 0cm ground temperature and community economy factors such as GDP, population, water consumption, electricity consumption and anthropogenic heat, the causes of the difference of heat environment among different cities are analysed. Results show that the UHII estimated by different satellite data can reflect temporal and spatial variation of urban heat island. Value of heat island intensity on high temperature weather condition is not necessarily higher than on non-high weather condition. Change of urban heat island by remote sensing has consistency by meteorological observation only in night. That is, the heat island intensity is the highest in winter and is the lowest in summer, but on the contrary in day. The UHPI estimated in 2012 for different countries in Beijing-Tianjin-Tangshan urban group region shows that Tianjin municipal district, Beijing municipal district and Chaoyang district are the first three high heat island intensity districts and the UHPIs are 0.86, 0.85 and 0.74, separately. The UHPI of Tangshan district is also achieved 0.50. The analysis of the causes shows that impervious surface cover is most important underlying surface factor. Land surface temperature by remote sensing can reflect more spatial distribution of heat island than by meteorological observation. Heat island intensity for cities in Beijing-Tianjin-Tangshan area has linear positive correlation with GDP, population, water consumption, electricity consumption and the determination coefficients R^2 of the linear corresponding regression models are 0.513 1, 0.485 3, 0.483 6 and 0.306, respectively. And heat island intensity has logarithm correlation with anthropogenic heat and the determination coefficient R^2 is 0.672 3. Impervious surface cover, water consumption per capita and mean air temperature are the most important factors of heat environment difference in Beijing-Tianjin-Tangshan area. They reflect respectively effect of underlying surface parameters, community economy activity and climate background on spatial difference of urban heat island.

Key words: urban heat island intensity; heat island proportion index; temporal and spatial variation; analysis of causes; impervious surface cover; Beijing-Tianjin-Tangshan