

DOI: 10.5846/stxb201409301935

葛荣凤,王京丽,张力小,田光进,冯悦怡.北京市城市化进程中热环境响应.生态学报,2016,36(19):6040-6049.

Ge R F, Wang J L, Zhang L X, Tian G J, Feng Y Y. Impacts of urbanization on the urban thermal environment in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36 (19): 6040-6049.

北京市城市化进程中热环境响应

葛荣凤¹, 王京丽², 张力小^{1,*}, 田光进¹, 冯悦怡¹

1 北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875

2 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

摘要:城市热岛效应是快速城市化过程带来最明显的生态环境问题之一,理清其形成和演变规律对城市规划、人居环境改善等具有重要意义。利用 1991—2011 年间 8 期夏季(6—8 月)Landsat-5 TM 遥感影像反演的地表温度空间场作为基础数据,通过定义热岛强度与热岛容量指数,并利用重心模型与 Moran's *I* 全局自相关等空间分析方法,对受城市化影响的典型区域——北京六环区域内热岛效应的时空动态变化特征及演变规律进行分析。结果表明:20 年间六环内热岛强度总体上呈现增长趋势,其平均值在 5.73—9.27℃ 之间,统计意义上,北京市六环内热岛强度的增长速率为 1.35℃/10 a;空间格局上,南北纬度的变化较东西维度明显,但总体上呈现破碎化态势,全局 Moran's *I* 指数从 1991 年的 0.63 下降到 2011 年的 0.16;空间重心模型显示研究区内热环境变化的圈层特征明显,受功能疏解等因素的影响,城市中心二环区域的热环境呈现一定程度的好转。

关键词:热岛效应;热岛强度;城市化;城市规划;空间自相关

Impacts of urbanization on the urban thermal environment in Beijing

GE Rongfeng¹, WANG Jingli², ZHANG Lixiao^{1,*}, TIAN Guangjin¹, FENG Yueyi¹

1 State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China

Abstract: The urban heat island (UHI) effect is one of the many typical ecological problems caused by rapid urbanization both in China and all over the world. Understanding the dynamics of the UHI effect in urban areas is essential to the improvement of human settlement and better urban planning. In this study, a region enclosed by the six-ring road of Beijing was adopted as the sample area, due to the rapid urbanization processes it has undergone over the past 20 years. Based on the land surface temperature (LST) retrieval methods from Landsat-5 TM in summers of 1991, 1993, 1996, 1999, 2004, 2007, 2009, and 2011, indicators of UHI intensity (HII) and capacity index of UHI (HCI) were established. Furthermore, the global spatial autocorrelation index and a gravity center model were used to describe the temporal and spatial dynamics of the UHI effect in the study area quantitatively. The results show that the average HII fluctuated from 5.73℃ to 9.27℃ from 1991 to 2011, with an increasing rate of 1.31℃/10a, indicating the worsening trend of the thermal environmental conditions in the study area over the past 20 years. With regard to the spatial patterning, changes occurring in north-south dimension were significantly more evident than those in the east-west dimension. The overall pattern tended to be fragmented and this can be demonstrated by the decrease in Moran's *I* index from 0.63 in 1991 to 0.16 in 2011. The gravity center model showed that the UHI effect spread outwards with the urban planning activities in circle ring, from weak to intensive expansion. The location of the gravity center was initially in the zone of the second-ring, the center of case area, and then transferred successively from east to north and south, and finally returning back to the center. The enclosed area of

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2012BAC13B01);国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51421065)

收稿日期:2014-09-30; 网络出版日期:2016-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanglixiao@bnu.edu.cn

the second-ring showed evident improvement of thermal environmental conditions, due to the changes over time of the region's function.

Key Words: urban heat island (UHI); heat island intensity; urbanization; urban planning; spatial autocorrelation

城市热岛(UHI)是指由城市化引起的城市地表及大气温度高于周边非城市环境的一种现象^[1],通常用城市中心城区温度与郊区温度的差值作为热岛强度的表征指标。城市化过程对城市热环境的影响主要通过两方面来实现:第一,改变了自然下垫面的热属性。相对于由水、土和植被构成的自然表面,以混凝土、沥青为材料的建筑物和道路组成的城市下垫面一般具有较大的热容性、较小的反照率以及很小的蒸发和蒸腾,从而能够更有效地将入射太阳辐射转换为热量并储存^[2];第二,接纳工业、交通、商业和生活等城市经济活动排放的大量废热。作为典型的“城市病”之一,热岛效应的产生及演变与城市化进程、人类社会经济活动密切相关,是城市生态环境状况的综合概括与体现。鉴于其对城市的生态、环境质量、居民健康甚至城市经济产生的危害,城市热岛的空间分布特征、形成演变机制及减缓措施等问题成为研究的热点^[3-5]。

众多学者采用气象观测及遥感影像反演等方法对热岛的时空分布及演变规律进行了研究^[6-7]。其中,气象观测法具有数据时间跨度大、准确以及定量的优势,多用于热岛时间序列变化分析中,如昼夜变化^[8]、季节分布^[9]以及年际增率等^[10]。但在研究城市环境空间格局与演变特征时,多利用遥感影像的热红外通道反演地表温度(LST),其中MODIS数据(分辨率1 km)以及Landsat TM/ETM+数据(分辨率分别为120 m、60 m)得到了广泛应用。例如,王建凯等^[11]、Tran等^[12]均使用MODIS地表温度产品分析了北京热岛强度的变化,发现最大热岛强度出现在夏季,范围在5—10℃之间。MODIS数据具有较好的时间分辨率,但是空间分辨率较低。王文杰等^[13]、彭静等^[14]分别利用6期TM/ETM+影像分析了北京城市化发展与城市热岛效应变化关系,证实了城市化过程对区域热岛效应的影响规模与强度。杨沈等^[15]利用1988—2006年20期Landsat TM和ETM+数据分析了北京市城市热岛的季节变化特征,并采用多项式拟合获取了城市热岛强度的季节变化曲线。但是,对同一时段或季节(如夏季)仍然缺乏较长时间序列的研究。需要说明的是,受遥感影像成像条件的限制,由遥感影像反演出的LST并不一定真实反映特定时段的平均温度,反演得到LST绝对值一定程度上缺乏可比性,但热岛强度及其空间格局信息却能够较好的反映出城市化进程中的热环境变化规律。例如,Qiao等^[16]利用1989、2000和2010三期TM/ETM+影像分析了北京地区热岛效应的空间格局变化。但是一般来说,少于5个序列的相关数据来归纳演变规律缺乏明显的说服力。此外,现有的研究基本上都以北京整个行政区作为研究对象,区域内非城市化因素引起的土地利用变化如土地沙化等,对相关结论也会产生一定的影响。

鉴于此,本文利用1991—2011年间8期夏季Landsat-5 TM遥感影像,以受城市化影响的典型区域——北京六环内区域为研究对象,对其近20 a热岛效应的动态变化进行研究,探讨其时空变化特征与格局演化规律,力求为新一轮的城市总体规划与人居环境改善等城市生态文明建设提供量化决策依据。

1 研究区域

北京六环内区域是近20年来受城市化影响最为显著的区域,尽管其面积仅占北京总面积的14%,却容纳了全市超过60%的居住人口以及62%的GDP总量^[17]。市区内各环线围合区域基本上代表了城市扩张的轮廓路线,形成了以故宫为中心,以二、三、四环为中心城区,五、六环为城市拓展区的空间格局^[13]。为最大程度上减少遥感影像时相差异的影响,本研究选取受城市化影响相对较小的百花山自然保护区核心区域为空间参照区(图1)。研究区内均属于平原地,海拔高度在20—60 m之间,海拔引起的温度差异可忽略不计。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究使用的数据主要为Landsat-5 TM遥感影像(美国USGS地球资源观察系统数据中心, <http://>

glovis.usgs.gov), 过境时间约为北京时间 10:00。在充分考虑北京城市化发展进程以及时间尺度特征的基础上, 选取 1991—2011 年间夏季(6—8 月, 1 期为 5 月 28 日) 有代表性、数据质量好的 8 期 TM 遥感影像(表 1), 云量均低于 7%, 地面特征清晰, 图像干扰较少。遥感影像数据处理采用遥感图像处理软件平台 ENVI 4.8, 以及地理信息系统软件平台 ArcGIS 9.3。

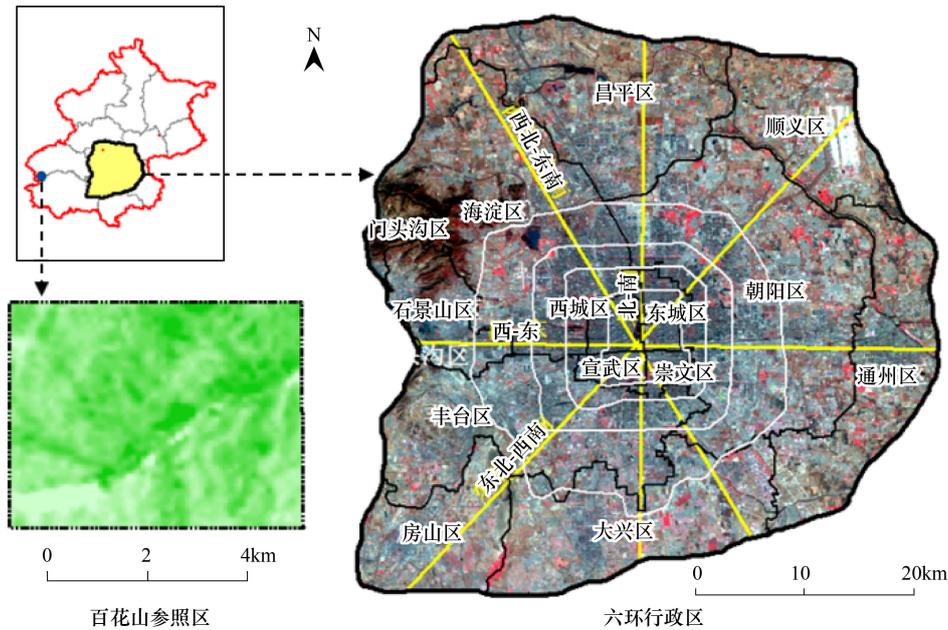


图 1 研究区地理位置示意图

Fig.1 Location of the study area

图中灰色区域基本上代表楼房、道路等城市下垫面, 黄色线条为本研究的采样带

表 1 遥感数据信息

Table 1 Information of remote sensing data used in this study

序号 Number	日期 Date	云量/% Clond	序号 Number	日期 Date	云量/% Clond
1	1991-06-17	1.0	5	2004-07-06	4.0
2	1993-08-25	0.0	6	2007-05-28	0.0
3	1996-06-30	0.0	7	2009-07-20	4.0
4	1999-07-09	7.0	8	2011-06-08	0.0

2.2 研究方法

2.2.1 地表温度反演

本研究选取的影像为无云或少云, 且研究区域内地形差异较小, 大气的空间影响可忽略不计, 故选取对大气参数依赖性小的基于影像的反演方法(IB), 来反演研究区内 LST, 相关方法的详细说明见文献^[18]。由于本研究仅关注研究区内热岛效应的变化趋势与空间格局特征, 且已有研究表明城市下垫面辐射温度与低空(1.5 m) 气温呈显著线性关系, 因此用 LST 来分析城市热岛效应是可行的^[19-20]。

2.2.2 热岛强度定义

参照热岛强度定义^[5], 本研究将热岛强度(HII) 定义为六环内影像中每个像元点的 LST 与百花山参照区平均 LST 的差值, 计算公式为:

$$HII_{ij} = T_{ij} - \bar{T}_b \tag{1}$$

式中, HII_{ij} 、 T_{ij} 分别为六环区域中空间位置为 i, j 像元的 HII、LST, \bar{T}_b 为百花山参照点的平均 LST。

2.2.3 热岛容量指数构建

以往研究中对区域尺度热岛效应进行分析时,多直接比较热岛强度变化特征^[21],或通过密度分割及归一化方法^[22]进行强度区间划分后进行面积加和统计,但孤立地采用热岛强度或面积衡量热岛效应发生的显著程度,结论往往存在一定片面性^[23]。本研究根据二重积分几何函数,综合热岛强度、面积两方面信息,构建热岛容量指数(Capacity Index of Urban Heat Island, HCI),以求最大程度定量反映研究区内热岛效应发生的显著性。HCI 越大,城市热岛效应的影响越大,对人居环境质量的影响就越大,计算公式如下:

$$HCI = \iint HII(i, j) d\sigma \quad (2)$$

式中, $HII(i, j)$ 为空间位置为 i, j 像元点的热岛强度, i, j 为像元坐标, $d\sigma$ 为面积元素。

2.2.4 热岛强度截面差值分析

受城市空间拓展时序的影响,热岛效应在不同方位呈现不同的变化趋势,本研究建立西-东、北-南、东北-西南以及西北-东南 4 条采样带(图 1),对采样带上 2011 年与 1991 年的 HII 进行差值计算,以表征热岛效应在不同城市拓展维度上的变化特征,计算公式如下:

$$HII_{i,j,d} = HII_{i,j,2011} - HII_{i,j,1991} \quad (3)$$

式中, $HII_{i,j,2011}$ 、 $HII_{i,j,1991}$ 分别为采样带 i 上像元 j 2011、1991 年 HII 值。

2.2.5 空间自相关分析

空间自相关作为空间单元属性值聚集程度的一种度量指标,主要体现同一个变量在不同空间位置上的相关性^[24-25]。自相关中的全局分析在探测单元属性值在整个研究区域的空间分布模式时得到了广泛应用,其中最常用的分析方法是 Moran's I 指数^[24,26]。Moran's I 指数取值范围近似为 -1 — $+1$ 之间,值越接近 -1 代表单元间的差异越大或分布越不集中,越接近 $+1$ 则代表单元间的性质越相似(高值或低值聚),接近 0 则代表单元间不相关。本文采用 Moran's I 全局指数对六环内 HII 进行分析,揭示 HII 在六环范围内的空间聚散程度,计算公式如下:

$$I = [n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij}(x_i - x)(x_j - x)] / [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2] \quad (4)$$

式中, I 为全局指数, x_i 为六环内 i 像元的属性值, $x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, C 为空间权重矩阵,反映空间单位 i 与 j 的空间关系,是由 0 和 1 组成的对称矩阵,若 i 与 j 相邻,则 C_{ij} 为 1,若不相邻,则 C_{ij} 为 0。

2.2.6 空间重心模型

空间重心,作为表征地理对象空间分布状况的重要指标^[27],在展示地表要素空间分布倾向性的同时,也反映了整体上的非均衡性和“高密度”部位。决定重心的因素有两个方面:研究区域的地理位置以及属性的变化^[16]。研究区域地理位置保持不变,那么重心变化则反映研究属性的变化。本研究借鉴空间重心模型,对年际六环内 HII 进行空间重心轨迹分析,区域地理位置相对不变,重心则主要随 HII 的空间变化而变化,对进一步揭示六环内热岛格局演变特征,具有重要意义。HII 重心 $Q(\bar{X}, \bar{Y})$ 的地理坐标,计算公式如下:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n m_{ii} x_i}{\sum_{i=1}^n m_{ii}} \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n m_{ii} y_i}{\sum_{i=1}^n m_{ii}} \quad (5)$$

式中, x_i 、 y_i 分别为第 i 个像元的几何中心坐标; m_{ii} 为第 i 个像元面积。

3 结果与分析

3.1 热岛强度的时间变化特征

图 2 为研究区遥感影像反演 LST 后计算的 HII 空间分布图。由图可看出,六环内 HII 较高区域的面积总

体呈现上升趋势。在 1991 年的时候,强度较高的红色区域基本上分布在二环以内,此后逐渐沿三环、四环向外扩展,到 2004 年以后基本上遍布整个六环区域。自 1996 年以后,机场周边的顺义城区、西南方向房山和大兴城区的高温区日渐清晰,而门头沟与海淀交接部分的香山区域“冷岛”也凸显了出来。HII 的这种年际变化也体现在其数值统计上,图 3 呈现了 20 年间研究区域内 HII 的最大值、最小值、中位值以及上下四分位强

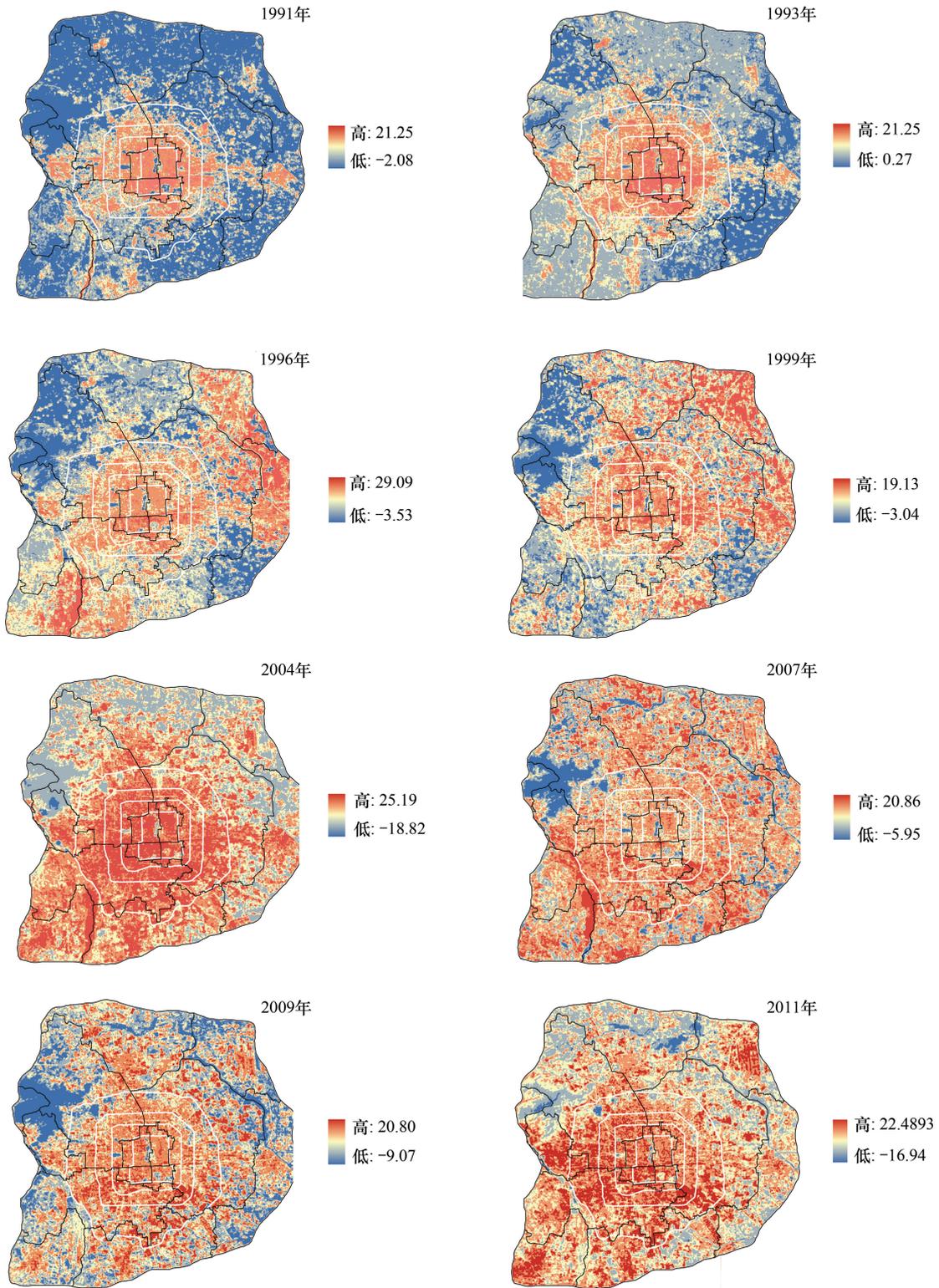


图 2 1991—2011 年北京六环热岛强度空间分布图
Fig.2 Spatial distribution of HII in the zone of six-rings of Beijing during 1911—2011

度值的分布情况,其中黑色折线为年际 HII 的均值变化曲线。HII 均值在 5.73—9.27°C 之间,统计意义上,北京市六环内 HII 的变化速率为 1.35°C/10a。曹广真等^[28]利用 MODIS 遥感数据研究表明北京市 2006 年 LST 相比 2001 年增长 1.22°C,与本研究中呈现的结果基本一致(图 3)。需要说明的是,对比同年 HII 均值与中位值可发现,1996 年前均值普遍大于中位值,而 2004 年与 2009 年均值与中位值几近重合,在 HII 下降调整的年份如 2007,其均值却小于中位值,如果这个规律具有普适性的话,对于判断区域热岛效应的动态变化具有重要指示意义。

由图 4 各环线 HCI 变化可看出,不同环线围合区内年际热岛效应变化存在较大差异,但基本呈现与六环内 HII 大体一致的变化趋势,总体表现为波动上升。波动较明显的区域主要集中在 4—5 环与 5—6 环之间的围合区域,而 2 环内与 2—3 环围合区,除在 2004 年出现明显升高外, HCI 年际变化不显著。究其原因,主要是 3 环内区域城市化在 20a 前已基本完成,这两个区域形成了以居住、文教为主稳定的土地利用格局,发展空间已限定且无弹性,城市地表下垫面的改变渐少,因此环内区域 HII 变化趋缓。同时,由于 3、4 环路开通以及其环内区域的开发建设一定程度上疏解了 2 环内旧城区的产业形态与人口居住行为,加之旅游服务为导向的城市绿化景观建设等,共同导致了 2 环区域内 HII 的波动下降趋势。而 3—5 环区域是近 20 年来城市化发展最为快速的区域,城市拓展的峰面不断在其内部推进,特别是奥运会期间该区域大规模的场馆建设等造成了土地利用剧烈变化,导致热岛区域不断扩大,使这个区域的总体 HCI 呈现波动变化趋势。而 5—6 环围合区域 HCI 较大,此区域是城市未来空间拓展的重要区域,对其采取植被建设、水体修复等缓解热岛效应的措施,对于维系区域热环境格局、削减热环境容量具有重要意义。

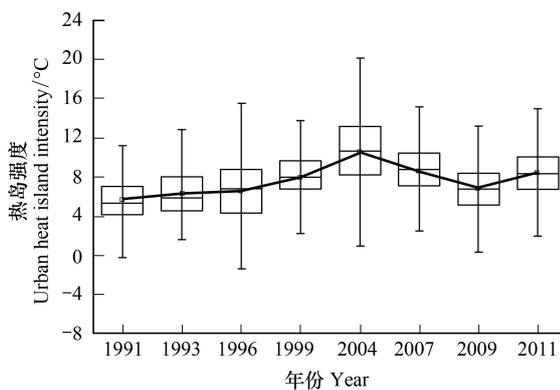


图 3 北京六环区域 1991—2011 年间热岛强度变化趋势

Fig.3 The dynamics of average HII during 1911—2011 for the case area

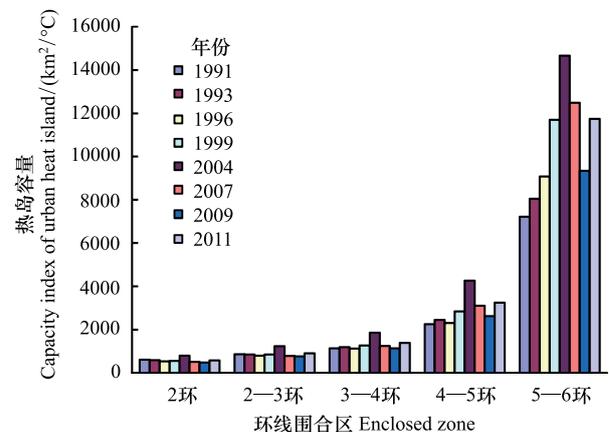


图 4 六环各环线内围合区域 1991—2011 年间热岛容量变化趋势

Fig.4 The dynamics of HCI for different sub-zones during 1911—2011

3.2 热岛强度的截面变化特征

对四条采样样带进行差值统计,结果见图 5,其中横坐标表示采样累积计数,计数增加的方向与图中标示的采样指向一致;纵坐标表示对应采样栅格内 HII 的差值,正值表示 HII 增强,热环境恶化,负值则表示 HII 减弱,热环境改善。

由图 5 可看出,不同采样样带内或者不同的城市拓展方向上,热岛效应呈现不同的变化规律。其中,北-南、西北-东南采样带中 HII 差值波动及震荡幅度较大,正向差值与负向差值短距离内交替出现,说明采样样带附近区域 20 年间土地利用类型发生了较为剧烈变化;而西—东轴线处 HII 波动性变化较有规律,呈现明显的弦状波动式变化,在二环内及周边区域出现负值区域,说明二环内的热环境状况有所改善;北-南轴线采样样带内 HII 变化呈现出较为明显的北弱南强特征,变化较大的地方集中在南四环周边,后经延伸至 5—6 环围

合区内达到区域高峰;而西北-东南采样样带内除二环围合区外,均呈现显著的热岛增强趋势,主要是因为以海淀为代表的北部区域与以大兴/亦庄为代表的南部区域,先后经历过快速的城市化建设。HII 减弱显著区域多集中在水体以及绿地等地,例如西-东路径采样起始点处为永定河,其最大差值达到 -5.2°C ,西四环五棵松附近也出现了局部负向差值,北-南样带 200 采样点处奥林匹克森林公园,也表现为热岛减弱区,而二环热岛减弱区处也多为途径了南海、北海等水体。

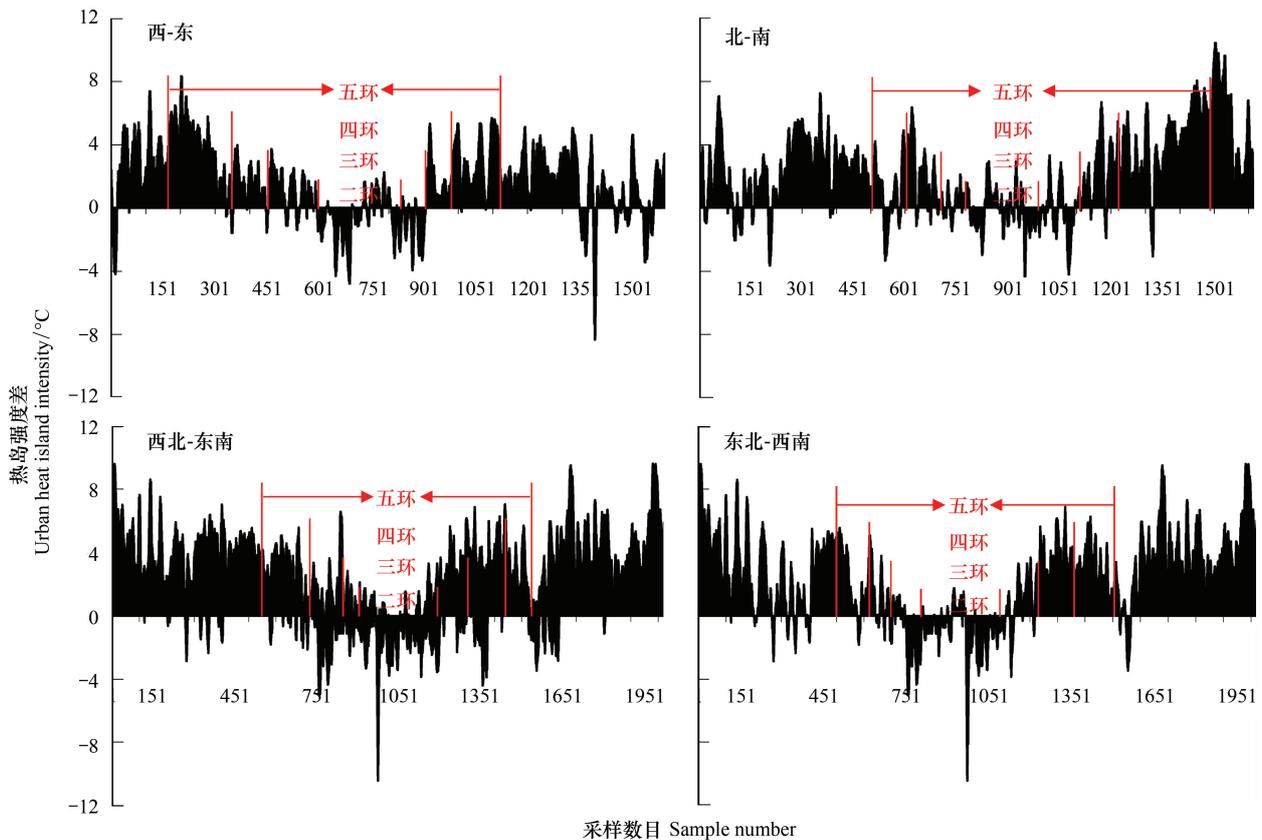


图5 不同采样样带中 1991 年与 2011 年热岛强度差值变化

Fig.5 The difference of HII between 1991 and 2011 in different sample path

以西-东、北-南轴线交点为中心,计算 8 个维度 2011 年与 1991 年 HII 差值正向采样数目占相应方向总采样样本的比例,结果如图 6。由图可见,20 年间六环内热岛效应增强主要体现在南北维度上,在西北的海淀区和南部大兴区/亦庄两个方向最为明显;东西维度上,城市开发建设的历史相对较早,研究期内土地利用变化较小,热岛效应的变化趋势不如南部维度上明显,这与 Quan 等基于 MODIS 遥感数据反演 LST,构建高斯体积模型,获得的北京市 2000—2012 年热岛方向拓展结果基本相同^[29]。

总体来说,20 年间 HII 在不同维度发生了显著变化,采样样带中四环—五环、五环—六环热岛普遍显著恶化,HII 增强区的分布及扩展与城市拓展方向建设高度吻合;热岛随不同城市下垫面改变而发生显著变化,其中热容量高的不透水材料对热岛的恶化有促进作用,而大型绿地、水体等则可生成局部“冷岛”,对热岛有明显缓解作用。

3.3 热岛强度的空间格局分析

由图 2 可以看出,除了热岛面积的不断扩大外,城市热岛的空间分布也呈现日趋破碎化的趋势。从 8 期遥感反演的结果来看,1994 年前指示强热岛板块的红色区主要集中在城市中心的二环、三环区域内,这也是符合实际情况的。北三环路于 1994 年实现通车,在此之前,三环内区域工业、商业、居住等功能区高度集中,人口、高建筑较为密集,而植被覆盖率相对较低,从而导致了热岛高温区在此区域内呈现集中式单中心分布特

征,并在二环旧城区内形成了集聚度极高的强热岛区,在东西维度上,即东部通州区、西部石景山区,呈现了模糊的延伸,五环以外区域热岛效应不明显。1994年后,北京城市建设取得了快速的发展,城市热岛的空间格局也发生了明显变化。HII 红色区域由三环旧城区逐渐向外拓展,由单中心集中式转为多中心破碎连片式分布,在东部(通州大部分地区)、北部(顺义区、昌平区)及南部(丰台区、大兴区)等六环边缘区域得到了较大扩展。2007年后,受新一轮城市规划及北京郊区卫星城市建设的影响,通州、顺义逐渐形成了以现代制造业、高新技术产业为主的第二产业集聚区,这在一定程度上疏解了中心城区的产业和人口,而区域内绿化具有一定时滞性,从而使 HII 红色区域在东侧及东北侧分散式铺排,并呈现明显的零散化和破碎化,这与 Zhang 等^[30]的研究结果具有一致性。图 7 中空间自相关分析计算得到全局 Moran's *I* 指数,从 1991 年的 0.62 以几近线性递减趋势下降至 2011 年的 0.16,进一步证实了研究区内热岛效应空间分布的破碎化趋势。尽管如此,Moran's *I* 指数 2004 年之前的数值均高于 0.5,说明此前 HII 在区域内的分布差异性较小,离散程度相对较低,连片分布特点还是较为明显的,热岛红色区与热岛低温区集聚性(高高或低低)的变化不明显,但此后就不断趋于破碎化。

目前,基于规模遥感影像重心分析探讨热岛效应的发展及演变趋势的研究较少,仅 Quan 等对北京市 2000—2012 年进行了热岛的季节及昼夜重心研究^[29]。本研究中采用的空间重心点位,可反映区域整体上的非均衡性和“高密度”部位,即城市的空间拓展方向与强热岛板块的空间迁移变化。图 8 显示了研究期内六环区域内 HII 的重心迁移轨迹。由于六环区域总体上呈现不规则的正方形,因此其重心的变化路径基本上可以认定是强热岛板块牵引作用下的结果。由图可看出,1991—1995 年间重心始终分布在二环内的核心区域,并向西北部有所偏移。在此期间,北京热岛核心区主要为二环、三环内,城市工业、商业、居住等功能区高度集中;1996—2006 年间,北京市内四环路全面贯通,建成区面积不断以环线向外圈层扩展,其中 2000 年昌平区的天通苑、回龙观等大型居民住宅区相继落成,其高密度的住宅建筑、高聚集的人口数量及规模形成了成片的热岛红色区,并与海淀区的上地、清河连成一片(图 3),且受该时段内朝阳区快速城市化,特别是首都机场的扩建影响,重心出现了较明显的转移趋势,依次向东部及东北部移动。2004 年与 2007 年重心点突然南移,主要是受房山地区建材矿业开发以及永定河河道断流沙化引起的,其实这个时段内南部北京的城市化率并不高,开发南城战略也是 2009 年才开始提出并实施的;此后随着南部城市的建设,以及遍布北京的房地产开发热潮,导致城市高温区环绕中心区呈较为均匀的零散化分布,使得热力中心再次回归到二环内的核心区域。

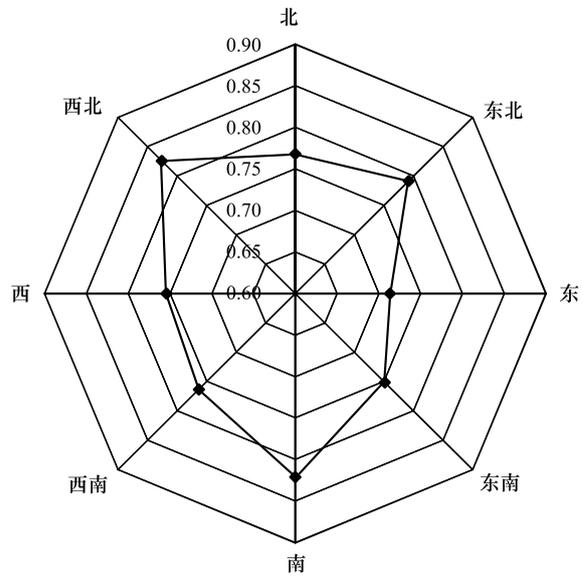


图 6 样带内正向差值比例雷达图
Fig.6 The positive values percentage of HII between 2011 and 1991 in difference directions

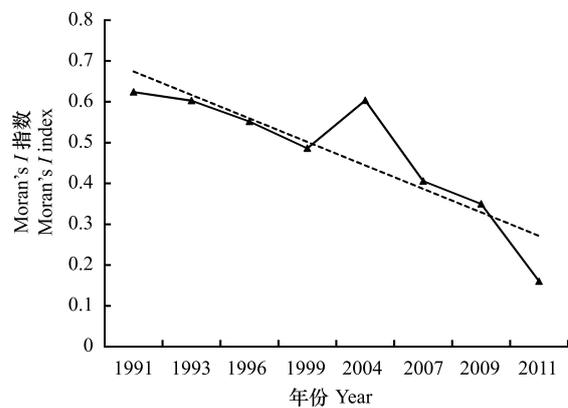


图 7 六环内 1911—2011 年间地表温度全局自相关 Moran's *I* 指数变化曲线
Fig.7 Global spatial autocorrelation index of HII in the zone of six rings during 1911—2011

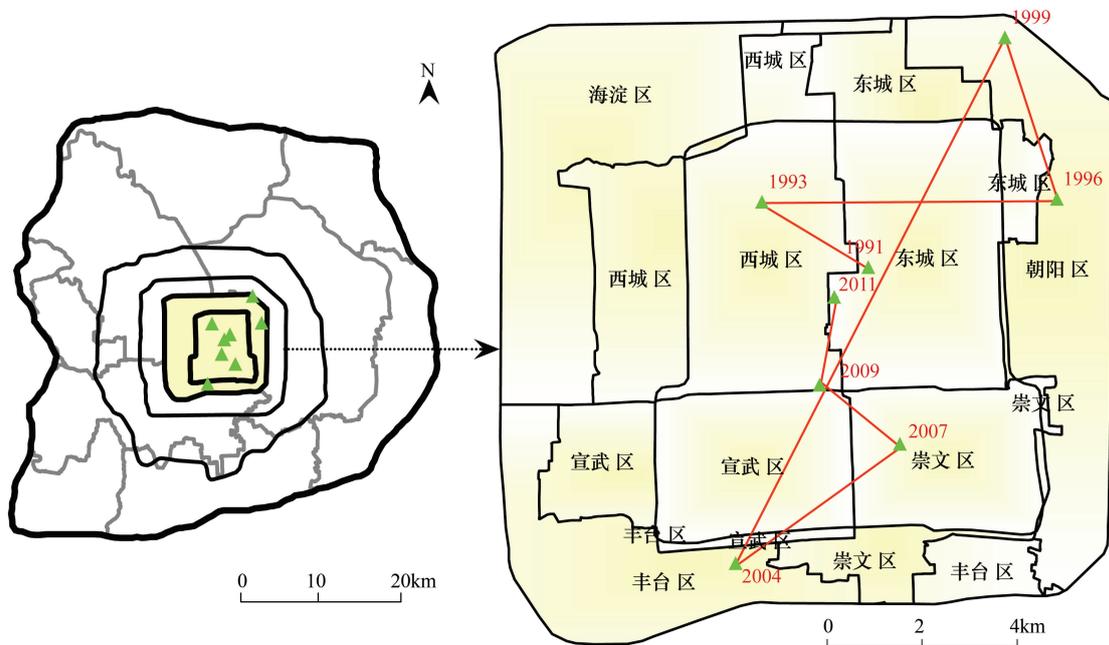


图 8 1991—2011 年间北京六环内热力重心年际迁移路径

Fig.8 Change path of HII gravity center in six rings of Beijing during 1911—2011

4 结论

通过对 1991—2011 年 20 年间夏季北京六环区域内 8 期 Landsat-5 TM 遥感影像反演的 LST 时空格局动态分析,发现:

(1) 在 20a 城市化过程作用的驱动下,六环内 HII 较高的区域面积总体上呈现上升的趋势。1991 年基本上分布在二环以内,此后逐渐沿三环、四环向外扩展,到 2004 年以后基本上遍布整个六环区域。HII 平均值在 5.73—9.27℃ 之间,统计意义上,线性增率为 1.35℃/10a。

(2) 研究期内 HII 的增强主要体现在南北维度上。具体而言就是西北的海淀区和南部大兴区/亦庄两个方向最为明显;在东西维度上,受地理区位及开发规划等因素的影响,研究期内土地利用变化较小,热岛效应的变化趋势不如南部维度上明显。

(3) 总体上 HII 空间分布格局呈现破碎化趋势。全局 Moran's *I* 指数从 1991 年的 0.63 下降到 2011 年的 0.16,空间重力模型显示研究区内热环境变化的圈层特征明显,受功能疏解等因素的影响,城市中心的二环区域热环境呈现明显的好转。

参考文献 (References):

- [1] 彭保发, 石忆邵, 王贺封, 王亚力. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律——以上海市为例. 地理学报, 2013, 68(11): 1461-1471.
- [2] 寿亦萱, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望. 气象学报, 2012, 70(3): 338-353.
- [3] 戴晓燕, 张利权, 过仲阳, 吴健平, 栗小东, 朱燕玲. 上海城市热岛效应形成机制及空间格局. 生态学报, 2009, 29(7): 3995-4004.
- [4] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982, 108(455): 1-24.
- [5] Howard L. Climate of London Deduced from Metrological Observation. 3rd ed. London: Harvey and Dorton Press, 1833, 1: 348.
- [6] 江学顶, 夏北成. 珠江三角洲城市群热环境空间格局动态. 生态学报, 2007, 27(4): 1461-1470.
- [7] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 张兆明. 城市热岛时空特征及其影响因素. 生态学报, 2007, 27(2): 230-236.
- [8] Lee S H, Baik J J. Statistical and dynamical characteristics of the urban heat island intensity in Seoul. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 100(1/2): 227-237.
- [9] Weng Q H, Yang S H. Managge the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city. Journal of Environmental

- Management, 2004, 70(2): 145-156.
- [10] Zhou B, Rybski D, Kropp J P. On the statistics of urban heat island intensity. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(20): 5486-5491.
- [11] 王建凯, 王开存, 王普才. 基于 MODIS 地表温度产品的北京城市热岛(冷岛)强度分析. *遥感学报*, 2007, 11(3): 330-339.
- [12] Tran H, Uchihama D, Ochi S, Yasuoka Y. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2006, 8(1): 34-48.
- [13] 王文杰, 申文明, 刘晓曼, 张峰, 潘英姿, 罗海江. 基于遥感的北京市城市化发展与城市热岛效应变化关系研究. *环境科学研究*, 2006, 19(2): 44-48.
- [14] 彭静, 刘伟东, 龙步菊, 胡菊芳. 北京城市热岛的时空变化分析. *地球物理学进展*, 2007, 22(6): 1942-1947.
- [15] 杨沈斌, 赵小艳, 申双和, 海玉龙, 方永侠. 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*, 2010, 33(4): 427-435.
- [16] Qiao Z, Tian G J, Zhang L X, Xu X L. Influences of urban expansion on urban heat island in Beijing during 1989-2010. *Advances in Meteorology*, 2014; 187169.
- [17] 北京市统计局. 北京统计年鉴 2013. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [18] 冯悦怡, 胡潭高, 张力小. 城市公园景观空间结构对其热环境效应的影响. *生态学报*, 2014, 34(12): 3179-3187.
- [19] 徐涵秋, 陈本清. 不同时相的遥感热红外图像在研究城市热岛变化中的处理方法. *遥感技术与应用*, 2003, 18(3): 129-133.
- [20] Chen L X, Zhu W Q, Zhou X J, Zhou Z J. Characteristics of the heat island effect in Shanghai and its possible mechanism. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(6): 991-1001.
- [21] Streutker D R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(13): 2595-2608.
- [22] Weng Q H. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, 69(5): 555-566.
- [23] 周纪, 陈云浩, 李京, 翁齐浩, 易文斌. 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*, 2008, 12(5): 734-742.
- [24] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 1992, 24(3): 189-206.
- [25] 赵亮, 刘吉平, 田学智. 近 60 年挠力河流域生态系统服务价值时空变化. *生态学报*, 2013, 33(10): 3169-3176.
- [26] Getis A. Reflections on spatial autocorrelation. *Regional Science and Urban Economics*, 2007, 37(4): 491-496.
- [27] Zhang S Q, Zhang J Y, Li F, Cropp R. Vector analysis theory on landscape pattern (VATLP). *Ecological Modelling*, 2006, 193(3/4): 492-502.
- [28] 曹广真, 侯鹏, 毛显强. 北京市城市化对地表温度时空特征的影响. *气象*, 2010, 36(3): 19-26.
- [29] Quan J L, Chen Y H, Zhan W F, Wang J F, Voogt J, Wang M J. Multi-temporal trajectory of the urban heat island centroid in Beijing, China based on a Gaussian volume model. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 149: 33-46.
- [30] Zhang J H, Hou Y Y, Li G C, Yan H, Yang L M, Yao F M. 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*, 2005, 48(S2): 220-229.