

## 城市扩张下的哈尔滨地表温度空间变化态势分析

娄阁 宁静\* 孙琦惠 郭磊 刘雪儿 赵超越

(东北农业大学 资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

**摘要** 为探究地表温度时空变化特征对城市热岛效应、生态环境质量的影响,以哈尔滨市为例,将以2001、2008、2013和2016年4期Landsat卫星遥感影像为基础数据,采用辐射传输法、密度分割、象限方位法、缓冲区分析以及回归分析等方法,对哈尔滨市地表温度进行反演并划分等级,分析哈尔滨市地表温度时空分异总体特征,同时定量揭示并阐述地表温度和归一化建筑指数NDBI的相关性。结果表明:高温区主要集中在相应时期的建成区及工业园区,而水体、绿地及耕地则表现出明显的低温区;2001—2016年哈尔滨市高温区域扩张明显,但是在不同时期表现出不同的扩张方向、范围和模式;高温区域与城市建设用地空间分布具有一致性,城市化进程和人口流动加快高温区范围的扩张;地表温度和NDBI呈显著正相关,NDBI在表征热环境特征方面具有一定代表性。

**关键词** 地表温度; 归一化建筑指数; 时空演变; 城市扩张; 遥感

中图分类号 P463.3

文章编号 1007-4333(2018)10-0122-08

文献标志码 A

## Analysis of spatial variation of land surface temperature in Harbin under the urban area expansion

LOU Ge, NING Jing\*, SUN Qihui, GUO Lei, LIU Xueer, ZHAO Chaoyue

(College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract** Research on the spatial and temporal variation of surface temperature is crucial to establish appropriate urban heat island mitigation strategies and improve the environmental quality. The radiative transfer algorithm was used to retrieve land surface temperature (LST) in Harbin City in summer of 2001, 2008, 2013 and 2016. Density segmentation, orientation quadrant, buffer analysis and regression analysis method were adopted to perform inversion and classification of land surface temperature, analyze the land surface temperature space change characteristics, reveal and expound the correlation between land surface temperature and the normalize construction index NDBI. The results showed that: From 2001 to 2016, significant high temperature regions were mainly in the Harbin urbanized area and industrial area, and significant low temperature were mainly in water bodies, green land and arable land; High temperature regions continuously increased during 2001 to 2016, while the expanding trend, extent and model differed from each other; The spatial distribution of the high temperature area and the urban construction land was consistent. The process of urbanization and population movements accelerated the expansion of the range of the high temperature area. A significant positive correlation between surface temperature and NDBI was discovered, which meant that NDBI was good indicator for marking surface thermal characteristics.

**Keywords** land surface temperature; normalized difference building index; space-time evolvement; urban expansion; remote sensing

地表温度(LST)作为城市热岛的典型指标,是城市扩张导致气候变化的关键性因素,更是城市生

态环境中的重要组成部分<sup>[1]</sup>。城市扩张导致城市下垫层属性发生改变,由水、土和植被所覆盖的自然表

收稿日期: 2018-01-09

基金项目: 绿色景观格局对城市热环境影响的定量研究(41101177)

第一作者: 娄阁, 硕士研究生, E-mail: lougewip@163.com

通讯作者: 宁静, 副教授, 主要从事土地生态环境问题及3s技术应用研究, E-mail: njing\_today@163.com

面被以混凝土、沥青为材料的建筑物和道路所替代<sup>[2]</sup>,这种城市下垫层覆盖特征的改变增加了城市地表的长波辐射、土壤热容量和热传导性,造成地表温度升高<sup>[3-4]</sup>。地表温度升高不仅影响到居民健康、生产活动和城市生态环境,而且会引起全球性气候和城市大气环境格局的变化,现已成为全球性的生态环境安全问题<sup>[5-7]</sup>。

目前,逐步恶化的城市空间热环境已成为现代全球化城市气候变化最突出的特点,研究城市热环境空间格局、演变特征及城市扩张与地表温度的关系等问题已成为国内外学者的关注焦点。主要利用不同遥感方法反演地表温度,并对地表温度进行分析,包括不透水面对地表温度的影响可超过植被和水体影响之和<sup>[8]</sup>;城市热岛分布范围与不透水面值范围具有良好的一致性,城市不断扩张、城市建设强度的增加对城市热岛效应产生重大影响<sup>[9-11]</sup>;为消除 NDVI 受季节的影响,利用 NDBI 对其进行补充和完善,进而更能清晰地表征城市地表特征<sup>[12-13]</sup>。

城市扩张必然导致地表用地类型的改变,进而改变地表温度格局。哈尔滨近些年城市建设发展迅猛,城市扩张强度较大。本研究选择哈尔滨市为研究对象,通过辐射传输法反演地表温度、归一化处理、象限方位法、缓冲区分析及回归分析方法,探讨城市扩张对哈尔滨市地表温度变化的影响,旨在为缓解城市热岛效应、改善城市生态环境提供科学参考。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

哈尔滨市位于黑龙江省中南部,是政治、经济、文化、交通中心。属于温带大陆性季风气候区,冬长夏短,夏季平均温度约 23℃。地貌类型主要为漫滩和高平原;大小河流包括松花江、阿什河、呼兰河等松花江水系。全市总面积约为 53 840 km<sup>2</sup>,辖 9 个市辖区、7 个县,代管 2 个县级市,其中市辖区面积 10 198 km<sup>2</sup>。2016 年户籍总人口 1 066.5 万。

为统一标准,本研究以哈尔滨市道里区、道外区、香坊区、南岗区、平房区以及松北区为本研究区范围。地理坐标为 126°08'13" ~ 126°59'37"E, 45°31'48" ~ 46°05'47"N,研究区面积为 2 067.10 km<sup>2</sup>。

### 1.2 数据来源及预处理

选择覆盖哈尔滨市主城区范围的 2001 年 7 月

27 日、2008 年 8 月 15 日 Landsat-5 遥感影像及 2013 年 7 月 12 日、2016 年 7 月 4 日 Landsat-8 遥感影像。对遥感影像进行预处理,预处理过程包括:辐射定标、大气校正、几何校正等。采用监督分类获取城市土地利用分类信息,利用热红外波段获取地表温度分布。辅以哈尔滨市行政区划矢量数据进行裁剪。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 地表温度的反演

参照相关研究,利用辐射传输法对 Landsat TM5 的波段 6、Landsat OLI 8 红外波段 10 波段进行地表温度反演。辐射传导方程主要依靠 MODTRAN 辐射传输代码和整体算法获取特定点的透过率和大气上辐射亮度,误差较小,仅为 3% 左右<sup>[14]</sup>。

地表比辐射率计算:依据覃志豪等<sup>[15]</sup>的研究,采用的是混合像元分解法将遥感影像分为水体、城镇和自然表面 3 种类型。

$$\epsilon_{\text{surface}} = 0.9625 + 0.0614 F_V - 0.0461 F_{2V} \quad (1)$$

$$\epsilon_{\text{building}} = 0.9589 + 0.0860 F_V - 0.0671 F_{2V} \quad (2)$$

式中: $\epsilon_{\text{surface}}$  和  $\epsilon_{\text{building}}$  分别是自然表面像元和城镇像元的比辐射率。 $F_V$  为植被覆盖度,根据归一化植被指数值 NDVI 确定。

$$F_V = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_S) / (\text{NDVI}_V - \text{NDVI}_S) \quad (3)$$

式中:NDVI 是归一化差异植被指数,  $\text{NDVI}_V = 0.70$  和  $\text{NDVI}_S = 0.00$ 。当其中某个像元的  $\text{NDVI} > 0.70$  时,  $F_V$  取值为 1;当  $\text{NDVI} < 0.00$ ,  $F_V$  取值为 0。

热红外辐射亮度值为

$$L_\gamma = \epsilon * B[T_s] + (1 - \epsilon)L_\downarrow \tau + L_\uparrow \quad (4)$$

式中: $\epsilon$  是地表辐射率,  $T_s$  是地表真实温度,  $B(T_s)$  是通过普朗克定律推出黑体在  $T_s$  的热辐射亮度,  $\tau$  是大气在热红外波段的透过率。

$$B(T_s) = [L_\gamma - L_\uparrow - \tau(1 - \epsilon)L_\downarrow] / \tau * \epsilon \quad (5)$$

式中:通过卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值  $L_\gamma$  由三部分组成: $L_\uparrow$  大气向上辐射亮度; $L_\downarrow$  地面真实辐射亮度经过大气层后传达到卫星传感器的能量;大气向下辐射到达地面后反射的能量。

热红外波段的辐射亮度通过温度为  $T_s$  的黑体获得,参照普朗克公式的反函数,得出地表真实温度  $T_s$ 。

$$T_s = K_2 / \ln \left( \frac{K_1}{B(T_s)} + 1 \right) \quad (6)$$

式中:  $K_1 = 666.09 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ ,  $K_2 = 1\ 282.7 \text{ K}$ 。

从而得到真实的地表温度值,单位为摄氏度。

### 1.3.2 地表温度等级划分

为消除成像时间不同对反演温度结果造成的偏差,本研究采用密度分割法对哈尔滨市反演的地表温度进行分级<sup>[16]</sup>,以此来反映不同时相的哈尔滨市地表温度及空间分布。

首先,对地表温度进行归一化处理<sup>[17]</sup>,将地表温度统一到  $0 \sim 1$ <sup>[18]</sup>。

$$N_i = \frac{T_i - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (7)$$

式中:  $N_i$  表示第  $i$  个像元归一化后的温度值;  $T_i$  表示第  $i$  个像元的值;  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  分别表示影像中地表温度的最大值和最小值。

其次,应用密度分割方法将归一化后的地表温度划分成 5 个等级:分别为极低温、次低温、中温、次高温和极高温区(表 1)。

表 1 地表温度等级划分

Table 1 Classification of different LST intervals

地表温度等级 Land surface temperature level	温度范围 The temperature range
极低温区	$T_i < T_m - 1.5T_a$
次低温区	$T_m - 1.5T_a \leq T_i < T_m - 0.5T_a$
中温区	$T_m - 0.5T_a \leq T_i < T_m + 0.5T_a$
次高温区	$T_m + 0.5T_a \leq T_i < T_m + 1.5T_a$
极高温区	$T_i \geq T_m + 1.5T_a$

注:  $T_i$  表示地表温度;  $T_m$  表示进行归一化处理所有像元的平均值;  $T_a$  表示归一化后所有像元的标准差。

Note:  $T_i$  indicates land surface temperature;  $T_m$  indicates the average value of all pixels after normalization;  $T_a$  indicates the standard deviation of all pixels after normalization.

### 1.3.3 高温区扩张及建设用地扩张分析

依据获得的四期土地利用、地表温度分布数据,以 2016 年的哈尔滨市建设用地中心为原点,分别参照象限方位法和缓冲带分析法将研究区划分为 4 个象限和 27 个 2 km 间隔的环形缓冲区,带入高温区域(次高温区及极高温区)面积、高温区域面积比重和建设用地比重,分析各象限以及

各缓冲区内的建设用地、地表温度时空分布特征以及两者之间的关系。其中高温区域面积比重是一定范围内城市内高温区域占该区域土地总面积的比例,建设用地面积比重是该区域内建设用地占土地总面积的比例。

### 1.3.4 归一化建筑指数

归一化建筑指数(NDBI)是由查勇等<sup>[19]</sup>提出的用于提取建设用地的数据。建筑用地面积越大、建筑物越密集所对应的 NDBI 值越大。计算公式为:

$$\text{NDBI} = (\text{TM5} - \text{TM4}) / (\text{TM5} + \text{TM4}) \quad (8)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 地表温度空间分布特征

通过辐射传输法,反演影像中每个像元的地表温度,再通过归一化以及密度分割法进行地表温度等级划分,从而得出哈尔滨市 2001、2008、2013 和 2016 年的整体地表温度分级图(图 1)。

从图 1 可看出哈尔滨市不同时期城市地表温度表现出相似的分布规律,哈尔滨市地表温度显著高于外围郊区,并呈现出岛状的高温区域,热岛现象较为明显。主要分为三类温度区域:1) 高温区域(次高温区和极高温区)主要集中在人口众多、道路交纵、高楼耸立、建筑物密度较大的哈尔滨市建成区或工业园区,表现出明显的高温现象。此外,位于松花江附近的裸地区域为高温区。表明建设用地和其他用地对高温现象的贡献较大。截止到 2016 年,江北区域和哈西新区已形成独立的高温区。2) 低温的蓝色或绿色区域主要为松花江、呼兰河等主要哈尔滨市城市水体,形成具有降温效果的低温廊道和“冷岛”区域。水体可以降低地表温度是由于水体具有较大的热容量、较低的热传导和热辐射率,有效的降低了地表热交换能力,改变了热量传输方式,达到降低地表温度的功能。此外,还有城市周边农用地和城市绿地,如太阳岛风景区、儿童乐园、黑龙江省森林植物园、丁香公园、哈尔滨高尔夫俱乐部以及哈尔滨市各大高校内等都存在“冷岛”的现象。这是由于绿色植物可通过植物光合作用和蒸腾作用能够有效的吸收太阳辐射,并且植物遮蔽效应还通过拦截太阳辐射以及通过改变空气运动和气流交换达到降低地表温度的效果,是维持城市生态系统平衡的重要土地利用类型<sup>[20]</sup>。3) 中温区的黄色区域较大多数代表耕地。可看出高温区范围呈现片状、斑点状和点状分布。

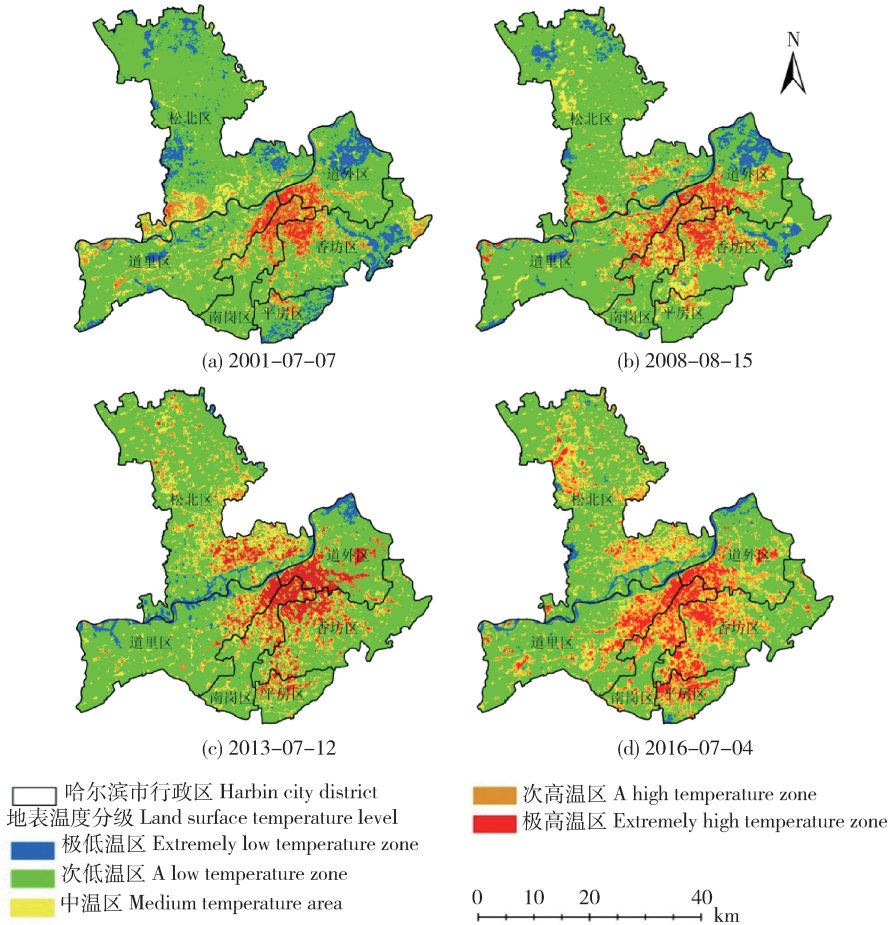


图 1 哈尔滨市地表温度时空分布

Fig. 1 Distribution of land surface temperature in Harbin

但是不同时期的热环境空间格局却表现出明显的差异。可从图上明显看出松北区北部在 2001 和 2008 年没有出现高温区域,而在 2013 和 2016 年有高温区现象出现,这是由于松北区的经济发展,使城市地表温度不断升高。此外,在 2001—2008 年的高温区域除了分布在建设用地外,还出现在哈尔滨市境内松花江的西部,这源于由裸地为主的松花江西部地区,裸地的地表反射率较高,因此导致了高温现象。而在 2008—2016 年高温现象消失,这与哈尔滨市政府在 2006 年对松花江沿岸实施“万顷松江湿地,百里生态长廊”方案,致使哈尔滨境内的松花江水系通过方案中的水利工程,其河道面积增加,松花江的支流、湖、泡、湿地

沼泽等水域面积增大,松花江流域中的裸地区域已被植被和水域所代替,很大程度上的缓解了高温现象。同时,城市内部的高密度建成区使市区高温现象更加显著。

## 2.2 城市扩张下地表温度的格局演变

不同土地利用类型的地表温度响应存在着差异,同时土地利用类型的时空动态变化也作用于地表温度的变化趋势。为实现定量分析研究区不同时期的各类土地利用类型的温度特征,应用 GIS 的空间分析和地统计模块,通过将地表温度与城市土地利用遥感分类图叠加,获得 2001、2008、2013 以及 2016 年的城市土地利用类型的地表温度平均值和标准差以及其变化的情况(表 2)。

表2 城市土地利用类型的地表温度特征

Table 2 Average normalized LST associated with land covers

土地利 用类型 Land use type	2001年		2008年		2014年		2016年	
	均温/°C Average temperature	标准差 Standard deviation	均温/°C Average temperature	标准差 Standard deviation	均温/°C Average temperature	标准差 Standard deviation	均温/°C Average temperature	标准差 Standard deviation
耕地	24.36	1.89	25.32	3.52	26.94	2.36	28.48	2.35
建设用地	29.36	3.96	31.41	3.49	31.34	3.54	33.62	2.68
绿地	26.69	2.46	27.23	3.88	28.29	2.75	29.82	2.87
其他用地	29.24	2.75	29.48	5.06	27.69	2.58	30.42	3.15
水域用地	23.71	2.24	22.89	2.89	25.67	1.99	26.88	2.11

由表2可看出,同一时间段不同土地覆盖类型的地表温度差异较为显著,但在各时期地表温度反映的基本特征基本吻合,即建设用地和其他用地均温最高,从低到高的地表温度顺序为水域用地、耕地、绿地、其他用地、建设用地。这是由于不同土地利用类型的植被覆盖状况存在显著差异。建设用地及其他用地温度最高,与耕地及绿地之间的温度差异形成城市热岛效应,这是由于城市建设用地多为混凝土、沥青为材料的建筑物和道路,对太阳辐射能量大量吸收,造成地表温度升高。绿地及水域用地由于范围内存在大量的植被覆盖,呈现出冷岛现象。这表明在高温区范围增加绿地、水域用地与高温斑块的接触边界,能降低区域地表温度,缓解城市热岛效应的产生。

从象限方位法分析结果来看,哈尔滨市各时期各象限内的高温范围在逐年增大,但有着明显的时空异质性。在2001—2008和2008—2013年2个时间段内城市高温范围扩张主要体现在第一象限和第四象限内。由此可见,在此时间段内主要向江北方向扩展,而在哈尔滨的南部高温现象并不明显。2013—2016年高温区域足迹迅速扩张,第三象限的高温面积扩张速率明显大于2001—2008和2008—2013年2个阶段,并且在此时间内,高温扩张的主趋势由第一、四象限转向第三象限,高温覆盖面积是2001年的3倍,说明哈尔滨市在2013—2016年城市化发展进程较快,哈西新区的建设和发展直接影响到哈尔滨市高温扩张的趋势,在哈西新区规划控制哈西新区的开发建设,留出足够的公共绿地空间,起到调节温度的积极作用,改善城市的温度状况。

在第一象限内2016年高温区面积较2013年面积减少,这是由于松花江流域哈尔滨段在2006年经过一系列的水利工程使河面加宽使地表温度降低产生的滞后性(图2)。

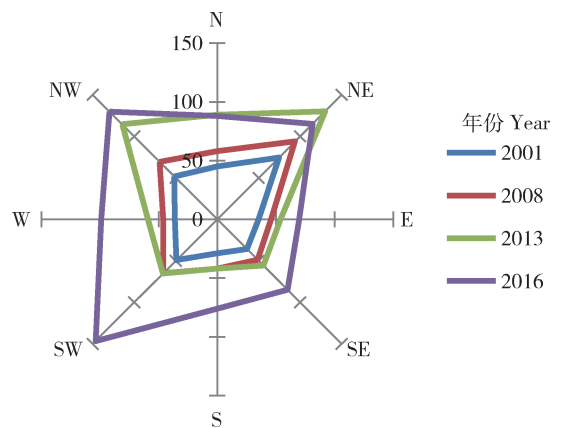
图2 各象限高温区面积(km<sup>2</sup>)

Fig. 2 Area of high-temperature area in four sectors

为进一步分析城市蔓延和地表温度时空变化之间的关系,运用缓冲带分析法统计每个圆环的城市高温区域面积比重和城市建设用地面积比重,得到环数与各环中高温区域面积比重年际变化图(图3)以及城市建设用地面积比重年际变化图(图4)。随着同心圆环向外扩张,高温面积比重随着圆环逐渐下降。在距离城市中心6 km以内的地区,高温区域面积比重明显高于其他圆环,比重达到60%以上,说明在此区域内城市中心热岛效应更为明显,地表温度最高。城市建成区中心2 km范围内有着较大面积的公园绿地等,由此在距哈尔滨市建成区中心的高温区域面积比重并没有达到最大值,而是在

2~4 km 内高温区域面积比重达到最大值。在 2001—2013 年哈尔滨市高温范围主要分布在距城市建成区中心 36 km 范围内的圆环内,而在范围外的高温区域面积比重趋于平稳且最低。2013 年后,高温区范围向城市外围扩张至 46 km(前 23 环),2016 年在 17 环处高温区面积比重达到最高为 17.04%。高温区范围随着城市建成区中心向各环形缓冲区扩张。

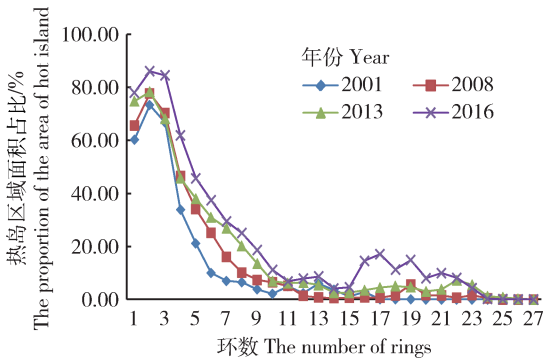


图 3 城市高温区域面积比重年际变化图

Fig. 3 Interannual variations of high-temperature area

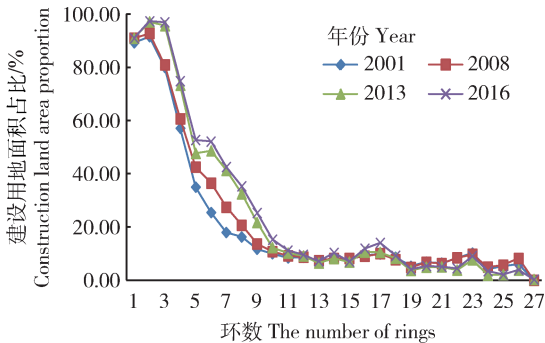


图 4 城市建设用地面积比重年际变化图

Fig. 4 Interannual variations of Urban construction land area

由图 4 可知 2001—2016 年哈尔滨市建设用地面积呈阶段性上升趋势,并随着同心圆环向外扩张,建设用地面积比重逐渐下降。距离城市建成区中心 6 km 以内的地区,建设用地比重达到 80% 以上。由于城市建成区中心 2 km 内存在大量公园绿地等,所以在距城市建成区中心的城市建设用地面积比重并没有达到最大值,而是在 2~4 km 达到建设用地面积最大值。在距城市中心 6~20 km,城市建设用地面积呈现急速下降的状态,降至 16%,而后在 20~54 km 建设用地面积趋于平稳且比重都在 0~16%。

对比图 3 和 4 可看出,高温区域面积比重年际

变化趋势和城市建设用地面积比重年际变化趋势极其相似,尤其是城市高温范围分布与哈尔滨市城市扩展的实际情况相一致,高温覆盖区域随着城市建设的加快不断向外扩张。由于建设用地多由不透水面构成,热传导率和热扩散能力系数较大,吸收太阳能辐射能力较强,且市区建筑物密度较高,整体空气流动性较差,导致建设用地地表温度升高,从而产生热岛效应。

### 2.3 地表温度与归一化建筑指数(NDBI)的关系分析

为揭示地表温度(LST)与 NDBI 之间的关系,对 LST 和 NDBI 进行线性回归分析。在 ArcGIS 软件中使用叠置分析,创建 1 km×1 km 的 Fishnet 渔网(实际有效点为 207 3 个),获得对应点的 LST 和 NDBI。研究二者的相关性,得到散点分布图(图 5)。相关系数分别为 0.318 3、0.495 2、0.345 2 和 0.681 3 且均通过 1% 的显著性检验。可以看出,LST 和 NDBI 具有显著地正相关。NDBI 越高,地表温度越高,城市建筑物对城市热岛效应起积极作用,所以后续城市建设中对老城区应采用高层低密度的布局方式,避免拥挤的建筑格局;对于哈西等新区,在其规划中应合理规划建筑物密度。

## 3 结 论

本研究利用 Landsat 遥感影像数据和土地利用数据,通过辐射传输法反演瞬时地表温度,并采用地表温度等级划分、象限分析法和缓冲带分析揭示地表温度进行空间变化特征。在此基础上,研究分析地表温度和 DNBI 相关关系。研究结论如下:

1)随着城市化和工业化程度的迅猛发展,哈尔滨市下垫层发生了剧烈的变化。不同土地覆盖类型的地表温度差异较为显著,高温区域主要集中在哈尔滨市建成区及工业园区,低温区域分布在水体、公园绿地及耕地。说明农田、植被、水体具有一定的降温作用。

2)城市高温区域扩张明显,不同时期表现出不同的扩张模型和方向。2001—2013 年高温区呈现出向北扩展的趋势,而在 2013—2016 年扩张的主趋势由北转向西南方向,这与近阶段哈西新区的不断开发与建设有着密切关系。哈尔滨市高温区域主要分布在距城市建成区中心 12 km 的区域,并且在距城市中心 2 km 内,高温区域面积比重并没有达到最大值,这是由于城市中心 2 km 内存在大量的公园绿地,绿地具有降温功效。由此可见,城市下垫层

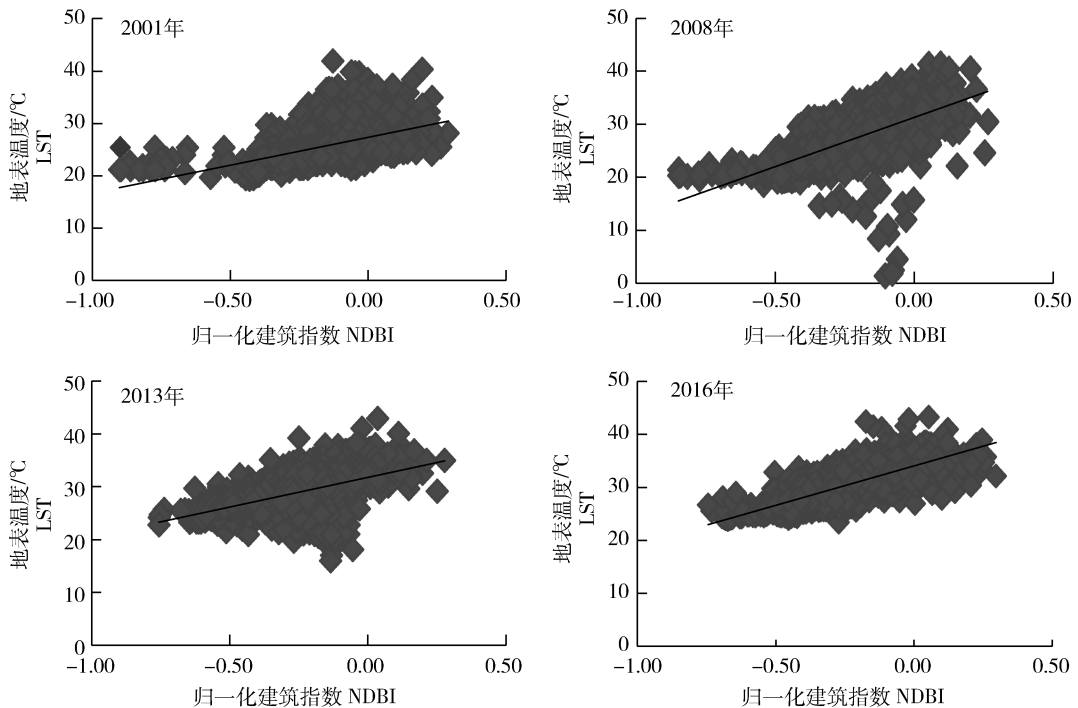


图5 2001—2016年LST和NDBI散点图

Fig. 5 LST and NDBI scatter illustration from 2001 to 2016

结构是地表温度总体分布格局的决定机制。

3)通过对哈尔滨市地表温度与NDBI的相关性分析表明:地表温度与NDBI之间呈显著的正相关,表明NDBI在表征热特征方面有较好的参数;密集的建筑群及工业园区的地表比热较大,导致地表平均温度较高。因此,在后续城市规划中应合理注意建筑物密度,对高密度建筑区进行改造,进一步改善城市热岛效应。

由于本研究区为哈尔滨市,夏天温度较高,冬季漫长,本研究在地表温度反演中,仅使用夏季(7—8月)一天的地表温度代表全年,有一定的片面性。在后续研究中应更进一步分析城市热岛的季节性变化。本研究只利用Landsat反演温度进行初步验证,缺少实测地表温度数据,在后续研究中将结合野外实测数据进行检验,今后需进一步深化研究。

## 参考文献 References

- [1] Hafner J. Urban heat island modeling in conjunction with satellite-derived surface/soil parameters [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(4): 448-465
- [2] 葛荣凤,王京丽,张小力,田光进,冯悦怡.北京市城市化进程中热环境响应[J]. *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 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(19): 6040-6049 (in Chinese)
- [3] Mohan M, Kandya A. Impact of urbanization and land-use/land-cover change on diurnal temperature range: A case study of tropical urban airshed of India using remote sensing data [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 453: 506-507
- [4] 徐涵秋,王美雅.地表不透水面信息遥感的主要方法分析[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1270-1289
- Xu H Q, Wang M Y. Remote sensing-based retrieval of ground impervious surfaces [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1270-1289 (in Chinese)
- [5] Parker D E. A demonstration that large-scale warming is not urban [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(12): 2882-2895
- [6] 陈利顶,孙然好,刘海莲.城市景观格局演变的生态环境效应研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(4): 1042-1050
- Chen L D, Sun R H, Liu H L. Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: Progresses, problems, and perspectives [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(4): 1042-1050 (in Chinese)
- [7] 张艳,鲍文杰,余琦,马蔚纯.超大城市热岛效应的季节变化特征及其年际差异[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(4): 1121-1128
- Zhang Y, Bao W J, Yu Q, Ma W C. Study on seasonal variations of the urban heat island and its interannual changes in a typical Chinese megacity [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(4): 1121-1128 (in Chinese)

- [8] 徐涵秋. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析[J]. 生态学报, 2011, 31(14):3890-3901  
Xu H Q. Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14): 3890-3901(in Chinese)
- [9] 乔治, 田光进. 基于 MODIS 的 2001—2012 年北京热岛足迹及容量动态监测[J]. 遥感学报, 2015, 19(3):476-484  
George, Tian G J. Dynamic monitoring of the footprint and capacity for urban heat island in Beijing between 2001 and 2012 based on MODIS[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(3): 476-484(in Chinese)
- [10] 谢启姣, 刘进华, 胡道华. 武汉城市扩张对热场时空演变的影响[J]. 地理研究, 2016, 35(7):1259-1272  
Xie Q J, Liu J H, Hu D H. Analysis on characteristics and influencing factors of urban heat island effect in Wuhan[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(7): 1259-1272 (in Chinese)
- [11] 叶钰, 秦建新, 胡顺石. 长沙市热岛效应时空特征变化研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(04):518-527  
Ye Y, Qin J X, Hu S S. Spatial-temporal evolution of urban heat island effects in Changsha City[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(04): 518-527(in Chinese)
- [12] 王艳慧, 肖瑶. 北京市 1989—2010 年地表温度时空分异特征分析[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(3):146-152  
Wang Y H, Xiao Y. A temporal-spatial variation analysis of land surface temperature in Beijing[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2014, 26(3): 146-152(in Chinese)
- [13] Macarof P, Stasescu F. Comparison of NDBI and NDVI as Indicators of surface urban heat island effect in Landsat 8 imagery: A case study of Iasi[J]. *De Gruyter*, 2017, 11(2): 141-150
- [14] 罗红霞, 邵景安, 张雪清. 基于辐射传导方程的三峡库区腹地地表温度的遥感反演[J]. 资源科学, 2012, 34(2):256-264  
Luo H X, Shao J A, Zhang X Q. Retrieving land surface temperature based on the radioactive transfer equation in the middle reaches of the three gorges reservoir area [J]. *Resources Science*, 2012, 34(2):256-264(in Chinese)
- [15] 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 陈仲新, 刘佳. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. 国土资源遥感, 2004, 16(3): 28-32  
Tan Z H, Li W J, Xu B, Chen Z X, Liu J. The tabular auto-generation technology for field survey in land-use dynamic monitoring[J]. *Remote Sensing for Land Resources*, 2004, 16(3): 28-32(in Chinese)
- [16] 蒋晶, 乔治. 北京市土地利用变化对地表温度的影响分析[J]. 遥感信息, 2012, 27(3):105-111  
Jiang J, George. Impact analysis of land surface temperature land use change on Beijing[J]. *Remote Sensing Information*, 2012, 27(3): 105-111(in Chinese)
- [17] 盛辉, 万红, 崔建勇, 郭鹏. 基于 TM 影像的城市热岛效应监测与预测分析[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(1):8-14  
Sheng H, Wan H, Cui J Y, Guo P. Urban heat island effect study and prediction analysis based on Landsat TM data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(1): 8-14(in Chinese)
- [18] 庄元, 薛东前, 王剑. 半干旱区典型工业城市热岛时空分布及演变特征: 以包头市为例[J]. 干旱区地理: 汉文版, 2017, 40(2):276-283  
Zhuang Y, Xue D Q, Wang J. Spatial-temporal evolution of urban heat island in semiarid typical industrial city: A case of Baotou City[J]. *Arid Land Geography: Chinese edition*, 2017, 40(2): 276-283(in Chinese)
- [19] 查勇, 倪绍祥, 杨山. 一种利用 TM 图像自动提取城镇用地信息的有效方法[J]. 遥感学报, 2003, 7(1):37-40  
Zha Y, Ni S X, Yang S. An effective approach to automatically extract urban land-use from TM imagery[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(1): 37-40(in Chinese)
- [20] 余兆武, 郭青海, 孙然好. 基于景观尺度的城市冷岛效应研究综述[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2):636-642  
Yu Z W, Guo Q H, Sun R H. Impacts of urban cooling effect based on landscape scale [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(2): 636-642(in Chinese)

责任编辑: 王燕华