

# 基于遥感的长沙市城市热岛效应时空分析

刘宇鹏<sup>①</sup>, 杨波<sup>①</sup>, 陈崇<sup>②</sup>

(<sup>①</sup> 湖南师范大学 GIS 研究中心 资源与环境科学学院, 长沙 410081;

<sup>②</sup> 南京大学 国际地球系统科学研究所, 南京 210093)

**摘要:**利用 TM/ETM+ 数据, 以长沙市为例, 反演了地表温度, 并针对不同时相的遥感数据, 利用城市热岛强度来反映热岛效应强弱的变化。结果表明, 长沙市的热岛空间分布与城市建成区的轮廓相吻合。城市热岛的范围随着城市建设、新建开发区以及道路交通网的发展不断增大, 且在东南方向为主要增长方向。根据热岛强度鉴别并提取了强热岛区与正常区, 发现长沙市强热岛区的面积已经从 1993 年的 13.18km<sup>2</sup> 扩大至 2008 年的 68.16km<sup>2</sup>。最后, 对长沙市热岛未来的发展趋势进行了预测。

**关键词:** Landsat TM/ETM+; 城市热岛; 地表温度; 热岛强度

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.06.015

**中图分类号:** TP79      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3177(2011)118-0073-06

## Temporal and Spatial Analysis of Urban Heat Island in Changsha Based on Remote Sensing Data

LIU Yu-peng<sup>①</sup>, YANG Bo<sup>①</sup>, CHEN Chong<sup>②</sup>

(<sup>①</sup> GIS Research Center, College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081;

<sup>②</sup> International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093)

**Abstract:** In this paper, the land surface temperature is retrieved and helped to calculate the multi-temporal heat island intensity based on Landsat TM/ETM+ data in Changsha city. The results show that the extent of UHI and the built-up area in Changsha city are consistent. The new area of UHI grows rapidly with the development of urban construction, new development zones and road transport network mainly in the east-south direction. The heat island area and normal area are distinguished according to the heat island intensity. The heat island area has extended from 13.18km<sup>2</sup> in 1993 to 68.16km<sup>2</sup> in the year 2008. At last, the development trend of heat island in Changsha city is predicted.

**Key words:** Landsat TM/ETM+; urban heat island; land surface temperature; heat island intensity

### 1 引言

城市热岛(Urban Heat Island, UHI)是指城区气温高、郊区气温低的现象, 在温度空间分布上, 城市犹如一个温暖的岛屿<sup>[1]</sup>。19 世纪, Lake Howard 针对伦敦市出现的这种现象首次提出“城市热岛”这个概念。而全球快速的城市化进程使得城市热岛现象变得越来越严重, 严重影响了城市的生态环境和

人居环境, 因此对城市热岛的研究引起了国内外的广泛重视。

以往针对城市热岛的研究主要采用定点观测和沿路线观测的办法, 但观测点数量有限, 观测密度不高。遥感技术的出现使得观测资料的获取技术出现了革命性的变化, 遥感数据具有覆盖范围广、资料获取同步性高等诸多优点<sup>[2~4]</sup>。1972 年, Rao<sup>[5]</sup>首次利用遥感卫星手段研究了城市热岛效应。目前, 城市热

收稿日期: 2010-11-23      修订日期: 2011-01-22

基金项目: 科技部中德国际科技合作重点项目(2007DFA90500), 湖南省自然科学基金项目(10JJ3022)。

作者简介: 刘宇鹏(1986~), 男, 硕士, 研究方向为热红外遥感应用与系统开发。

E-mail: yb@hunnu.edu.cn

岛研究的遥感数据源主要有 NOAA/AVHRR, EOS-TERRA&AQUA/MODIS, Landsat TM/ETM+ 等, 其中 Landsat TM/ETM+ 数据的热红外波段具有较高的空间分辨率(TM 120m, ETM+ 60m), 适于进行城市区域尺度的热环境研究<sup>[6~9]</sup>。

## 2 数据与研究区

长沙市是湖南省的省会, 位于湖南省东部、湘江中游, 与株洲市、湘潭市鼎足而立, 地理坐标为东经 111°53'~114°5', 北纬 27°51'~28°40'。2009 年, 长沙市 GDP 已达 3744.8 亿, 人口 664 万, 步入大城市行列。

本文选择从 1993 年~2008 年 6 景夏季 Landsat TM/ETM+ 数据(表 1)研究长沙市热岛的空间分布特征和年际变化特征。其中 1993 年和 2001 年的图像完整且质量好, 清晰无云; 2008 年数据完整但略有少量云; 1999 年和 2005 年数据无云但郊区略有缺陷。根据长沙市气象旬报描述(站点: 57679), 5 期数据在采集所在旬内天气晴好, 旬内气候干燥, 降雨极少( $\geq 0.1\text{mm}$  日数少于 3 日), 无大风(风速  $> 17\text{m/s}$ ), 因此大气状况对地表温度反演精度影响较小, 适于进行热岛效应研究。

表 1 Landsat TM/ETM+ 长沙地区数据

传感器	轨道号	获取日期
TM	123/41	1993.8.25
TM	123/40	1999.9.11
ETM+	123/40	2001.9.24
ETM+	123/41	2005.7.17
ETM+	123/40&123/41	2008.7.25

## 3 研究方法

图像经过最暗像元法进行辐射校正以消除大气影响, 经过几何校正(RMS $< 0.5$ )以便于对多年遥感数据进行多时相分析。

### 3.1 地表温度反演

首先, 把像元 DN 值转化为辐射亮度值。公式如下:

$$L_{\lambda} = (DN - 1) \times \frac{L_{\max} - L_{\min}}{255 - 1} + L_{\min} \quad (1)$$

公式中  $L_{\lambda}$  为辐射亮度 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ),  $DN$  为像元灰度值,  $L_{\max}$ 、 $L_{\min}$  为该波段  $DN$  值分别为 255 和 1 时所对应的光谱辐射率。其中 ETM+6 波段光谱辐射率低增益:  $L_{\min} = 0$ ,  $L_{\max} =$

$17.04\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ; ETM+6 波段光谱辐射率高增益:  $L_{\min} = 3.2\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,  $L_{\max} = 12.65\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。将其带入方程(1)中, 得到分别用来计算 Landsat7 ETM+ 第 6 波段低增益和高增益两种方式辐射亮度的公式:

$$L_{\lambda L} = 0.067DN - 0.067 \quad (2)$$

$$L_{\lambda H} = 0.0372DN + 3.16 \quad (3)$$

式中  $L_{\lambda L}$  为低增益辐射亮度,  $L_{\lambda H}$  为高增益辐射亮度。对于 Landsat5 TM 第 6 波段数据, 将其 DN 值转化成辐射亮度值公式如下<sup>[10]</sup>:

$$L_{\lambda} = 0.055158DN + 1.238 \quad (4)$$

再根据普朗克定律将辐射亮度值转化为亮度温度, 公式如下:

$$T_{\text{rad}} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (5)$$

式中  $L_{\lambda}$  为辐射亮度,  $T_{\text{rad}}$  为亮度温度, 对于 ETM+ 数据,  $K_1 = 666.09(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$ ,  $K_2 = 1282.71\text{K}$ 。而对于 TM 数据而言,  $K_1 = 607.76(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$ ,  $K_2 = 1260.56\text{K}$ 。

由于亮度温度与真实地表温度差距往往过大( $> 5^{\circ}\text{C}$ )<sup>[11]</sup>, 因此将亮度温度转化为地表温度, 公式如下:

$$T_{\text{Kin}} = \epsilon^{-\frac{1}{4}} \times T_{\text{rad}} \quad (6)$$

式中  $T_{\text{rad}}$  为亮度温度,  $T_{\text{Kin}}$  为地表温度,  $\epsilon$  为地表发射率, 对于大多数地表物质(水体、植被、岩石和土壤)而言, 比辐射率值通常在 0.93~0.99 之间<sup>[12]</sup>。根据不同地物比辐射率值的差异, 利用 NDVI<sup>[13]</sup> 和 MNDWI<sup>[14~15]</sup> 指数来构造决策分类树, 将土地利用/覆盖类型分为植被、水体、裸地和建筑用地(图 1)。其中植被的比辐射率为 0.986<sup>[16]</sup>, 水体为 0.995<sup>[16]</sup>, 裸地和建筑用地比辐射率相近, 近似看作 0.970<sup>[17~19]</sup>。经过亮温至地表温度转换后, 温度反演精度在  $2^{\circ}\text{C}$  左右<sup>[16]</sup>。

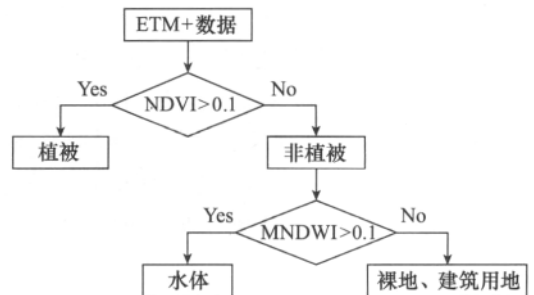


图 1 决策树分类

### 3.2 UHI 强度

热岛强度是一个相对的概念, 它反映了城市与

周围郊区的温度差异,通过将当地的温度均值作为因子代入计算,能够反映该地在其周边环境下热岛的强度。UHI 强度计算公式为:

$$HI = \frac{T_{Kin} - T_{Mean}}{T_{Mean}} \quad (7)$$

公式中  $HI$  为 UHI 强度,  $T_{Kin}$  为地表温度,  $T_{Mean}$  为平均温度。

### 4 结果与分析

#### 4.1 热场空间分布特征

从图 2 可以看出,长沙市的热岛空间分布与城市建成区的轮廓相吻合,热岛的范围在东北方向上以浏阳河为界,西至岳麓山西缘,南至大托镇—洞井镇一线。湘江以东是长沙市主城区,热中心主要以伍家岭市北工业区、五一路商业中心及居民区和市

南工业区为主;湘江以西的热中心则主要分布在岳麓区北部居民区及岳麓山东南侧湖南师范大学、湖南大学和中南大学为主的教学区及居民区(图 2(a)、(b)、(c)、(d)、(e))。造成市区热岛效应较强的原因在于城区地表主要由建筑、水泥地、混凝土以及柏油路面构成,其热容量小,在夏天吸收等量太阳辐射的情况下升温快,并且热量被贮存,导致热岛强度十分明显;街区的几何结构导致建筑与建筑之间的空间减小并且湍流减弱,不利于热传递;工业生产、车辆以及人群产生了大量的  $NO_2$ 、 $CO_2$ 、粉尘等温室气体。此外,位于东郊的星沙长沙经济技术开发区也呈现较强的热岛效应,这在 1993 年还不明显(图 2(a)、(a1)),但至 1999 年便已呈现较强的反应(图 2(b)、(b1)),至 2008 年星沙周边地区热岛效应也在增强,并与市区相连(图 2(e)、(e1))。

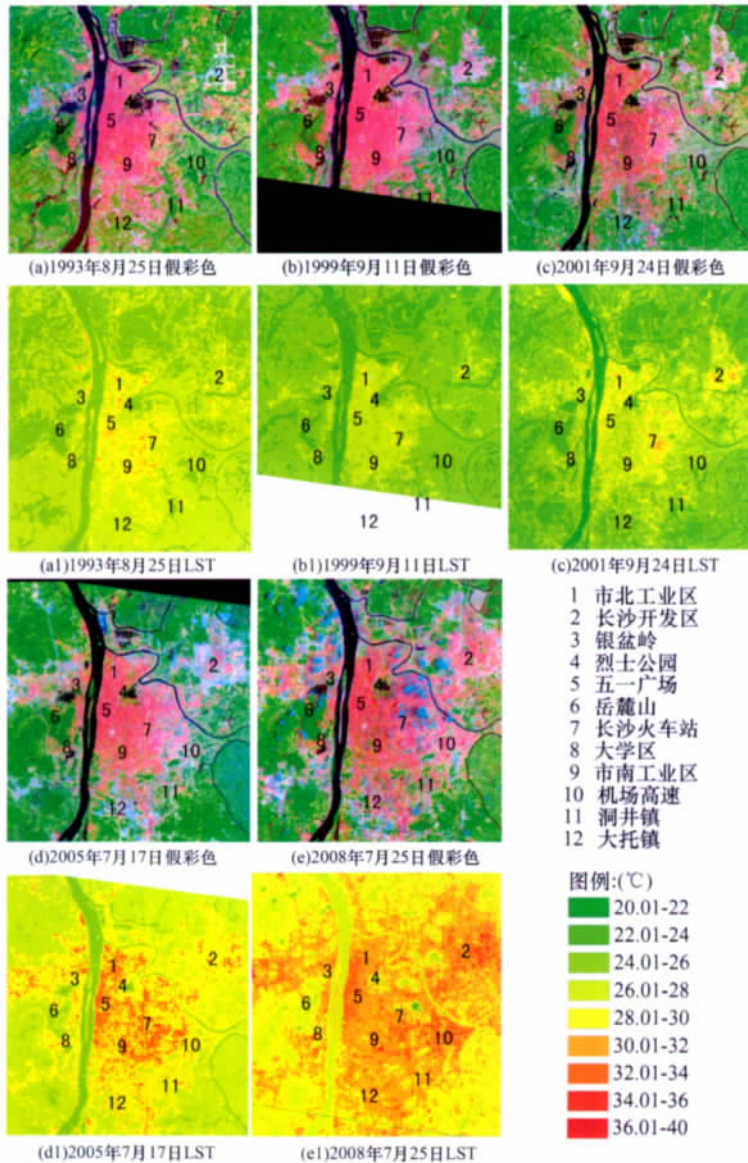


图 2 长沙市遥感影像图(假彩色 643 波段)及地表温度反演图

### 4.2 热场 UHI 强度

由于 TM/ETM+ 数据的获取季节不同,1999 年和 2001 年处于夏末秋初,1993 年、2005 年和 2008 年处于盛夏时期(表 2)。对比 5 年的数据,平均温度分别为 26.5℃、24.8℃、25.0℃、27.8℃和 29.6℃;5 年的最大温差为 10.5℃、9.1℃、15.5℃、10.0℃和 20.2℃;地表温度标准差为 1.2℃、1.2℃、1.8℃、1.5℃和 1.7℃。从平均温度以及后两个反映温度变化幅度的统计指标表明了单独选用地表温度作为指标来反映年际变化缺乏效力。季节的变化造成了 1999 年和 2001 年的地表温度整体比 1993 年、2005 年和 2008 年年略低,但这并不能说明相比这三年,1999 年和 2001 年的热岛消失,只能说明夏季的气温高于秋季,气候较炎热。

表 2 地表温度统计(单位:℃)

获取日期	最小值	最大值	平均值	标准差
1993.8.25	23.1	33.6	26.5	1.2
1999.9.11	21.9	31.0	24.8	1.2
2001.9.24	20.5	36.0	25.0	1.8
2005.7.17	24.1	35.1	27.8	1.5
2008.7.25	20.4	40.6	29.6	1.7

因此以 UHI 强度来体现城市热岛的强弱(图 3),将地表温度与当地地表温度均值进行变化后(式 7),能够比较全面地反映出研究区域的热岛特征。从图 3 的三维立体图可以看出长沙市区 UHI 强度高,地域集中于城区,相比郊区宛如一个温暖的岛屿。长沙东郊星沙所建立的长沙经济技术开发区也有强热岛效应。湘江形成了一个低温带将长沙热岛区分为东西两侧,造成这种现象是因为水的热容比大,热传导强,所以水体不宜积聚热量使其温度较低。在湘江中心的橘子洲呈现较强的热岛效应,与湘江对比明显。城市中部的烈士公园由于年嘉湖、跃进湖的存在以及较好的绿化植被热岛反应较弱。岳麓山以及岳麓山北缘的咸嘉湖也没有热岛反应。

在时间变化上,从 1993 年至 2008 年,热岛区域逐渐增长,其中 1993 年至 2001 年在范围上增长较快,强度上逐渐增强;2001 年至 2008 年在面积上增长有所放缓,在强度上反而逐渐减弱。这主要是因为随着城市的扩张,热岛范围增长,全市的平均温度大幅增加,从位于盛夏时期 1993 年的 26.5℃,至 2005 年的 27.8℃,2008 年更是达到 29.6℃。平均温度的增加使得热岛强度值整体上减小,但是 2008 年长沙市东部及南部的新建工业区热岛强度极高,也在一定程度上表明新兴工业园区比老居住商埠区对热岛强度的贡献更大。

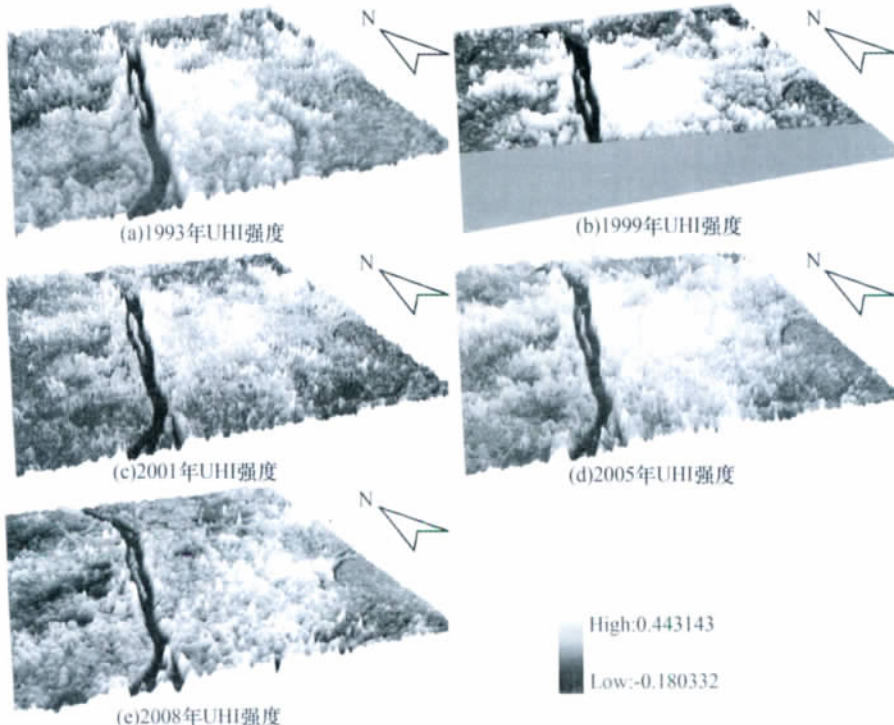


图 3 长沙 HUI 强度图

### 4.3 时空演变特征

选择 UHI 强度大于 0.1 的区域(相当于地表温度高于当地平均地表温度的 10%)作为热岛效应较

强烈的区域,由于 1999 年和 2005 年的数据资料不全,因此这里只对 1993 年、2001 年和 2008 年这 3 年的数据进行统计分析(表 3)。

表 3 1993 年、2001 年和 2008 年强热岛面积

方向 日期	市东		市南		市西		市北		总像元数	总面积(km <sup>2</sup> )
	像元	面积	像元	面积	像元	面积	像元	面积		
1993.8.25	2,452	1.99	7,922	6.43	2967	2.41	2,880	2.34	16,221	13.18
2001.9.24	23,398	19.00	16,542	13.43	10,224	8.30	12,030	9.77	62,194	50.52
2008.7.25	35,507	28.84	20,727	16.84	14,500	11.78	13,173	10.70	83,907	68.16

从总体上看,1993 年长沙全市的强热岛面积为 13.18km<sup>2</sup>,至 2001 年新增 37.34km<sup>2</sup> 达到 50.52km<sup>2</sup> (图 4),新增区域集中于长沙火车站以东的居民区以及市东郊星沙的经济技术开发区。2001 年至 2008 年新增强热岛面积 17.64km<sup>2</sup> 达到 68.16km<sup>2</sup> (图 4),新增区域集中于天心区和雨花区南部的居民点,雨花区东部沿机场高速一线的工厂区,此外,河西潇湘大道沿线的居民区、岳麓区北部长沙市政府及银盆岭周围的居民区、星沙周边热岛范围也有所增加。

(图 5)。由于城市化进程与热岛发展息息相关,因此表明 1993 年至 2001 年,长沙城市发展在各个方向均有扩展,但东部扩展最快。从 2001 年至 2008 年,城市发展速度总体上有所放缓,发展方向仍旧以东南方向为主。

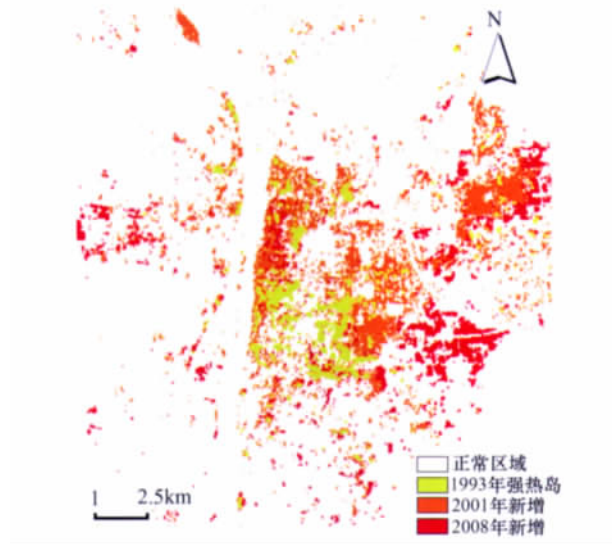


图 4 长沙热岛分布变化图

从长沙城市发展的方向上看,1993 年长沙市南部的强热岛面积达 6.43km<sup>2</sup>,占全市总面积的近 50%,表明城市热岛中心位于南部。从 1993 年至 2001 年,长沙热岛区域向东扩展迅速,其增长面积为 17.01km<sup>2</sup>,占全市热岛总增长面积的 45%,而在其他方向上均增长 7km<sup>2</sup> 左右且比较平均,因此城市热岛中心由南部向东部转移(图 5)。从 2001 年至 2008 年,热岛的扩展区域仍以东部为主,其增长面积为 9.84km<sup>2</sup>,其比例达到增长总面积的 50%

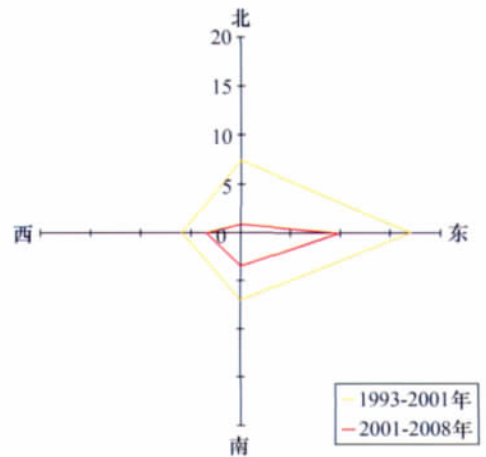


图 5 长沙热岛增长方向

### 4.4 热岛发展趋势

通过对数年来城市热环境的分析,发现长沙热岛范围扩大明显,随着公路交通网成线状扩展,随着新建开发区呈面状扩展且热中心均位于工业区以及密集的居民点。因此,长沙热岛未来的发展方向主要包括:①随着长沙高新技术开发区“麓谷”园区的建立以及 2007 年“大河西先导区”概念的提出,河西的岳麓区、高新区以及望城县的部分地区未来将成为热岛增强的主要区域。②随着长株潭“3+5”城市群的建立,长沙东郊“航空城”规模日渐增加,长沙向东南与株洲向西南与湘潭的对接趋势越来越明显,这也是热岛发展的一个方向。

## 5 结束语

本文基于 TM/ETM+ 数据对长沙市热岛的空间布局和年际变化进行了分析,结果显示长沙市热

岛的空间分布与城市建成区较为一致,随着城市建设、新建开发区以及道路网的发展热岛范围不断扩大且较为迅速,并且主要的扩展方向为东南方。日后的研究还需要从以下几个方面展开:

①地表温度与表示城市热岛的大气温度的概念并不等同,近似根据经验使用线性或非线性关系在两者之间转换也同样存在误差。在晴朗无风的情况下,二者差别较小,但城市往往由于其特殊的下垫面容易与市郊产生局地环流造成二者的转换误差较大。因此,建立地—气温度转换关系及过程模型很有必要。

②城市热岛并不是温度“绝对”高的区域,而是“相对”温度较高的区域。因此,可以在不同的空间尺度上使用不同尺寸的滑动窗口来提取温度“相对”高值区,辨别热岛的范围和面积,进而建立一种热岛分析提取模型。相比人工设定的阈值来区分热岛区域与非热岛区域,这种模型具有免受人为因素干扰的无偏特性。

③目前的城市热岛研究主要针对热岛范围及强度的监测,此外还应着重加强利用遥感数据进行城市热岛发展过程的模拟和预测研究,以寻求缓解城市热岛的方法和途径。

### 参考文献

- [1] 陈云浩,李京,李晓兵.城市空间热环境[M].北京:科学出版社,2003:1—5.
- [2] 李志乾,巩彩兰,胡勇,尹球,匡定波.城市热岛遥感研究进展[J].遥感信息,2009(8):100—105.
- [3] 胡华浪,陈云浩,宫阿都.城市热岛的遥感研究进展[J].国土资源遥感,2005(3):5—9,13.
- [4] 李福建,马安青,丁东原,杨俊杰,焦俊超,刘乐军.基于 Landsat 数据的城市热岛效应研究[J].遥感技术与应用,2009,24(4):553—558.
- [5] Rao P K. Remote sensing of urban heat islands from an environment satellite[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,1972(53):647—648.
- [6] 曹进,曾光明,石林,焦胜,周建飞.基于 RS 和 GIS 的长沙城市热岛效应与 TSP 污染耦合关系[J].生态环境,2007,16(1):12—17.
- [7] 陈云浩,史培军,李晓兵.基于遥感与 GIS 的上海城市空间热环境研究[J].测绘学报,2002,31(5):139—144.
- [8] 周红妹,周成虎,葛伟强.基于遥感与 GIS 的城市热场分布规律研究[J].地理学报,2001,56(2):189—197.
- [9] 宫阿都,江樟焰,李京,陈云浩,胡华浪.基于 Landsat TM 图像的北京城市地表温度遥感反演研究[J].遥感信息,2003(3):18—20.
- [10] Markham B,Chander G. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2003,41(11):2674—2677.
- [11] 覃志豪,LI Wenjuan,ZHANG Minghua,等.单窗算法的大气参数估计方法[J].国土资源遥感,2003(56):37—43.
- [12] Kuenzer C,Hecker C,Zhang J,et al. The potential of multidiurnal MODIS thermal band data for coal fire detection[J]. International Journal of Remote Sensing,2008,29(3):923—944.
- [13] 张月丛,赵志强,李双成,等.基于 SPOT NDVI 的华北北部地表植被覆盖变化趋势[J].地理研究,2008,27(4):746—754.
- [14] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):589—595.
- [15] 徐涵秋.基于谱间特征和归一化指数分析的城市建筑用地信息提取[J].地理研究,2005,24(2):311—320.
- [16] 覃志豪,李文娟,徐斌,等.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(3):28—32,36.
- [17] Nerry F,Labad J,Stoll M P. Spectral properties of land surfaces in the thermal infrared. 1. Laboratory measurements of absolute spectral emissivity signatures[J]. Journal of Geophysical Research,1990(95):7027—7044.
- [18] Salisbury J W,D'Aria D M. Emissivity of terrestrial materials in the 8—14um atmospheric window[J]. Remote Sensing of Environment,1992(42):83—106.
- [19] Zhang J. Spatial and statistical analysis of thermal satellite imagery for extraction of coal fire related anomalies[D]. Technical University Vienna,2004.