

文章编号:1672-058X(2012)11-0079-08

# 基于 Landsat TM 的地表热环境对城市扩展的响应\*

## ——以重庆市南岸区为例

胡弟维<sup>1</sup>,周启刚<sup>1\*\*</sup>,赵予爽<sup>1</sup>,杨沁汶<sup>1</sup>,王华魏<sup>2</sup>

(1. 重庆工商大学 旅游与国土资源学院,重庆 400067;2. 重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院,重庆 400067)

**摘要:**重庆直辖以来,城市建设步入高速发展阶段,城市热岛效应已成为城市生态问题的热点。以重庆市南岸区为例,以 1988、1993、2000、2007 年和 2010 年 5 个时期的遥感和矢量数据为基础,在 RS 和 GIS 的支持下,通过对南岸区建设用地重心转移、地表温度变化、热岛中心转移进行动态研究,分析了研究区建设用地重心转移过程、地表温度空间分布差异以及热岛中心运动特点。结果表明:研究区在 22 年间,建设用地扩展明显,重心逐渐向东南方向转移,且转移速度逐年提高;地表温度空间分布格局变化明显,城市热岛现象日益显著;城市高温区下垫面多以建设用地为主,城市低温区下垫面多以水域和高植被覆盖为主;城市热岛中心空间变化与建设用地重心空间变化具有较高的一致性。研究成果可为城市规划与城市生态环境保护提供决策参考。

**关键词:**地表热环境;城市扩展;Landsat TM;建设用地

**中图分类号:**X87

**文献标志码:**A

城市化是人类社会发展的必然趋势,随着城市化进程的加快,城市热岛效应日益增强。城市热岛是城市气候变化最显著的特征之一<sup>[1]</sup>。城市热岛效应加剧了城市高温出现的频率和高温灾害,导致夏季发病率提高,光化学污染加剧<sup>[2]</sup>。如何应对城市热岛问题已引起众多学者的广泛关注<sup>[3]</sup>。

随着卫星遥感的快速发展,国内外学者运用遥感数据对城市热岛进行了大量研究,成果显著<sup>[4-7]</sup>。其中国外学者主要集中于城市热岛效应与下垫面土地利用类型关系以及城市地表能量平衡等热岛形成机制方面的研究<sup>[8]</sup>,而国内多集中于研究城市发展 with 城市热岛之间的关系,且沿海大城市研究较多,对于内陆山地沿江城市研究还比较少。

以重庆市南岸区为研究区,以 1988、1993、2000、2007 年和 2010 年 5 个时期的遥感和矢量数据为基础,采用建设用地重心转移模型、单窗口算法、热岛中心计算模型,对南岸区地表热环境和建设用地扩展进行量化描述,分析其变化规律,探究研究区建设用地变化对地表热环境的影响,以期城市热岛效应的治理和生态环境保护提供参考。

收稿日期:2012-05-17;修回日期:2012-07-03.

\* 基金项目:国家自然科学基金;重庆市教委科学技术研究项目(KJ100703)和重庆工商大学科技创新项目(113005)共同资助。

作者简介:胡弟维(1990-),男,重庆巴南区人,从事土地资源管理专业研究。

\*\* 通讯作者:周启刚(1976-),男,博士,副教授,硕士生导师,从事 3S 理论与应用和土地资源管理研究。

## 1 区域现状

南岸区是重庆主城区的重要组成部分,位于东经  $106^{\circ}3'14''$ — $106^{\circ}47'2''$ 、北纬  $29^{\circ}27'2''$ — $29^{\circ}37'2''$  之间。全区幅员  $265 \text{ km}^2$ ,陆地占  $90.33\%$ ,河流占  $9.67\%$ 。辖 7 个街道、7 个镇,总人口近 60 万人。研究区位于川东平行岭谷区,背斜、向斜平行分布。海拔从 153 m 到 681 m 不等,总体起伏不大。地表形态以长江为主,过境段长 45 km,流经 7 个镇;另有流域面积大于  $80 \text{ km}^2$  的河流 2 条,流域面积  $10 \text{ km}^2$  及其以下的河流 9 条。该区属亚热带季风气候,热量丰富,雨量充沛,无霜期长,湿度大,年降雨量  $1\,097.8 \text{ mm}$ ,多年年平均气温  $18.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 数据源与研究方法

### 2.1 数据源

研究主要采用 Landsat-TM 1988、1993、2000、2007 年和 2010 年遥感矢量数据和影像数据, TM6 空间分辨率为 120 m,其余波段为 30 m。所有影像均经过几何校正,误差控制在半个像元内,并采用阿尔伯特等面积圆锥投影,中央经线采用东经  $110^{\circ}$ ,双标准纬线采用分别为  $25^{\circ}$  和  $47^{\circ}$ 。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 建设用地重心计算与迁移速率计算模型

土地利用类型重心能准确反应土地利用空间分布,研究其重心转移过程,能整体上反演南岸区建设用地的变化趋势,计算公式<sup>[9]</sup>如下:

$$X_t = \sum_{i=1}^n (c_{ii} \times x_i) / \sum_{i=1}^n c_{ii}; Y_t = \sum_{i=1}^n (c_{ii} \times y_i) / \sum_{i=1}^n c_{ii} \quad (1)$$

式(1)中,  $X_t, Y_t$  分别表示第  $t$  年建设用地重心坐标;  $C_{ii}$  表示第  $i$  块建设用地斑块面积;  $X_i, Y_i$  分别表示第  $i$  块建设用地重心坐标。

根据各时期建设用地重心坐标,可计算出建设用地重心迁移速率,公式如下:

$$V_{t_{i+1}-t_i} = \sqrt{(x_{t_{i+1}} - x_{t_i})^2 + (y_{t_{i+1}} - y_{t_i})^2} / (t_{i+1} - t_i) \quad (2)$$

式(2)中,  $X, Y$  分别表示某时期建设用地重心的  $X, Y$  坐标值;  $t_{i+1} - t_i$  表示地类重心转移的时间间隔;  $V_{t_{i+1}-t_i}$  表示时间为  $t_{i+1} - t_i$  内的地类重心年迁移速率。

#### 2.2.2 Landsat TM 热波段的地表温度反演

陆地表面温度(LST)是重要的地球物理参数,它在地气间物质与能量的交换过程中起着重要的作用,是区域和全球尺度地表物理过程中的一个关键参数<sup>[9]</sup>。LST 的分布状况可提供区域尺度热量空间分布格局<sup>[10]</sup>。许多学者针对不同的数据类型,通过对传统温度计算方法进行深入的分析,提出了适用于不同传感器的多种算法。利用热红外遥感反演地表温度已取得很多突破,其中分裂窗算法、多角度方法、辐射传输方程法、J&S 的单波段法、覃志豪单窗口算法运用较为广泛。

(1) 单窗口算法。单窗口算法是覃志豪等根据地表热辐射传导方程,推导出的一个利用 Landsat-TM 第 6 波段数据反演地表温度的算法,该方法的地表温度演算精度较高,将大气和地表的影响直接包括在演算公式中,其表达式如下:

$$T_s = [a(1 - C - D) + (b(1 - C - D) + C + D)T_6 - DT_a] / C \quad (3)$$

式(3)中,  $T_s$  是地表温度(K);  $a$  和  $b$  是常量,分别为  $-67.355\,351$  和  $0.458\,606$ ;  $C$  和  $D$  是中间变量,  $C = \varepsilon\tau$ , 其中,  $\varepsilon$  是地表辐射率,  $\tau$  是大气透射率;  $T_6$  是卫星高度上传感器所探测到的像元亮度温度(K);  $T_a$  是大气平

均作用温度(K)。对 Landsat TM,  $T_6$  可以用以下公式求算:

$$T_6 = K_2 / \ln(1 + K_1/L_\lambda) \quad (4)$$

$$L_\lambda = 0.1238 + 0.005632156 \times Q_{dn} \quad (5)$$

式(4)中,  $T_6$  是卫星高度上传感器所探测到的像元亮度温度(K);  $Q_{dn}$  为 TM6 的象元灰度值;  $L_\lambda$  为相应的热辐射强度;  $K_1$  和  $K_2$  为发射前预设的常量,对于 Landsat5 的 TM 数据,  $K_1 = 60.776 \text{ mW cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ W}\mu\text{m}^{-1}$ ,  $K_2 = 1260.56 \text{ K}$ 。

在标准大气压下,大气平均温度( $T_a$ )与近地面气温(一般为 2 m 处)  $T_0$  存在线性关系,其随季节的变化具有一定规律性。其近似值可以通过如下公式反演<sup>[11]</sup>:

中纬度夏季平均大气(北纬 45°, 7 月)

$$T_a = 16.0110 + 0.92621 \times T_0 \quad (6)$$

中纬度冬季平均大气(北纬 45°, 1 月)

$$T_a = 19.2704 + 0.91118 \times T_0 \quad (7)$$

大气投射率  $\tau$  可以根据不同气温条件下的大气总水汽含量  $w(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$  来估算。当大气水分含量在  $0.4 \sim 3.0 \text{ g/cm}^2$  变动区间时,大气透射率的估计方程<sup>[12]</sup>如下所示:

①温度为 35 °C 左右,水分含量在  $0.4w \sim 1.6w$  之间

$$\tau = 0.974290 - 0.08007 \times w \quad (8)$$

②温度为 35 °C 左右,水分含量在  $1.6w \sim 3.0w$  之间

$$\tau = 1.031412 - 0.11536 \times w \quad (9)$$

③温度为 18 °C 左右,水分含量在  $0.4w \sim 1.6w$  之间

$$\tau = 0.982007 - 0.09611 \times w \quad (10)$$

④温度为 18 °C 左右,水分含量在  $1.6w \sim 3.0w$  之间

$$\tau = 1.053710 - 0.14142 \times w \quad (11)$$

(2)地表辐射率估算方法。地表辐射率主要取决于地表的物质结构和遥感器的波段区间<sup>[8]</sup>,其中 Landsat TM6 的波段区间为  $10.45 \sim 12.6 \mu\text{m}$ 。覃志豪等<sup>[13]</sup>将地表比辐射率的计算分为水体、城镇和自然表面 3 种情况。对于水体,普遍认为其热波段辐射率很高,非常接近于黑体,可直接取  $\varepsilon = 0.995$ 。

在 ERDAS8.7 的支持下,采用监督分类等方法,将水体提取出来,赋予其地表辐射率值为 0.995,同时将城镇与自然表面分别提取出来。城镇及自然表面地表辐射率可根据以下公式进行估算:

$$\varepsilon_{\text{surface}} = 0.9625 + 0.0614P_v - 0.0461P_v^2 \quad (12)$$

$$\varepsilon_{\text{build-up}} = 0.9589 + 0.086P_v - 0.0671P_v^2 \quad (13)$$

式(12)、(13)中,  $\varepsilon_{\text{surface}}$  为自然地面地表辐射率,  $\varepsilon_{\text{build-up}}$  为城镇地表辐射率,植被覆盖度  $P_v$ ,可用以下公式进行演算:

$$P_v = [\text{NDVI} - \text{NDVI}_s] / [\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_s]^2 \quad (14)$$

式(14)中,NDVI 为归一化植被指数,取  $\text{NDVI}_v = 0.70$  和  $\text{NDVI}_s = 0.05$ ,且有,当某个像元的  $N$  大于 0.70 时,  $P_v$  取值为 1; 当 NDVI 小于 0.05,  $P_v$  取值为 0。

### 2.2.3 城市热岛中心计算模型

研究以 Landsat TM 数据为基础,依次反演 1988、1993、2000、2007、2010 年地表温度。通过地表温度反演结果设置一定的阈值,将研究区分为热岛区和普通区。其判断方式可通过以下模型来实现<sup>[14]</sup>:

$$\text{ROI}_i \in \text{HI}(\text{LST}_{\text{ROI}} > (\text{LST}_{\text{mean}} + \text{Std})) \quad (15)$$

式(15)中,  $\text{ROI}_i$  是某一研究兴趣区,HI 为热岛,  $\text{LST}_{\text{ROI}}$  是兴趣区的平均温度,  $\text{LST}_{\text{mean}}$  地表平均温度,Std 为地表温度的标准差。

热岛中心是热岛区的中心,通过统计城市热岛区各点到热岛中心的标准差距离,计算出热岛椭圆,能够较好地反映城市热岛的变化趋势。热岛中心坐标的确定方法为<sup>[10]</sup>:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (16)$$

式(16)中, $X_i$ 和 $Y_i$ 是特征 $i$ 的坐标值, $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 是中心点的坐标, $n$ 是热岛斑块的数量。

### 3 结果分析

#### 3.1 建设用地重心时空变化分析

研究在 ArcGIS9.2 的支持下,利用公式(1),根据不同时期建设用地斑块变化情况,计算各时期建设用地的重心坐标如表 1 所示:

表 1 建设用地重心坐标统计表

坐标	1988	1993	2000	2007	2010
$x$	-327 685. 898 1	-327 601. 146 9	-327 079. 874 7	-325 744. 719 6	-324 332. 783 4
$y$	1 916 105. 138	1 915 844. 894	1 915 389. 273	1 914 972. 817	1 915 040. 806

根据计算所得各时期建设用地重心坐标,采用公式(2)计算南岸区建设用地重心迁移速率,从重心迁移速率变化分析南岸区建设用地扩展的空间差异(图 1):

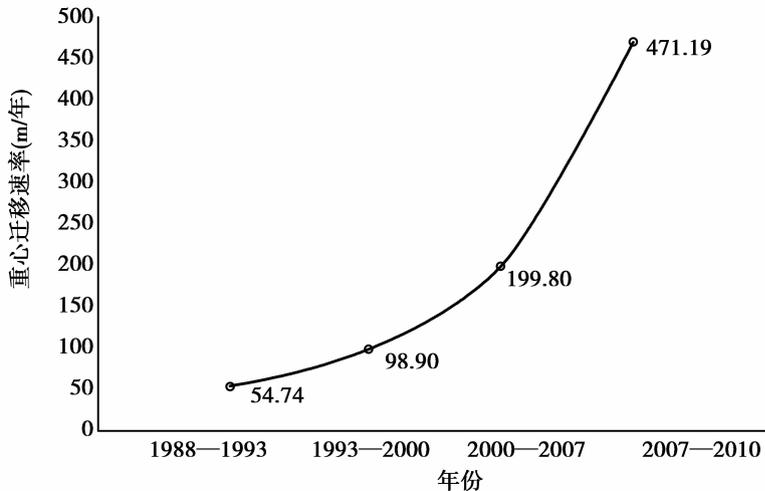


图 1 1998—2010 年南岸区建设用地重心迁移速度示意图

分析图 1 和表 1 可以得出,从重心分布情况来看,建设用地重心均位于研究区内部,2000 年以前,重心分布于研究区西部,2000 年以后逐渐迁移到东部,2010 年重心较 1988 年重心东移 3 353. 11 m;从重心年均迁移速度来看,1993 年以后,建设用地重心迁移速度明显高于 1993 年以前;从垂直方向上看,2000 年以前,南岸区建设用地主要分布在地势较为平缓的区域,2000 年以后建设用地逐渐出现在低山、丘陵地区,其重心转移方向受到区域高程影响较大。由此看出,南岸区 22 年间建设用地扩张方式主要为外延扩展型,扩展方向为研究区东南方向。

### 3.2 地表热环境时空变化过程分析

以重庆市南岸区为研究区,采用 Landsat-TM 1988、1993、2000、2007 年和 2010 年遥感影像数据,利用覃志豪单窗口算法对研究区进行地表温度反演<sup>[10]</sup>(图 2):

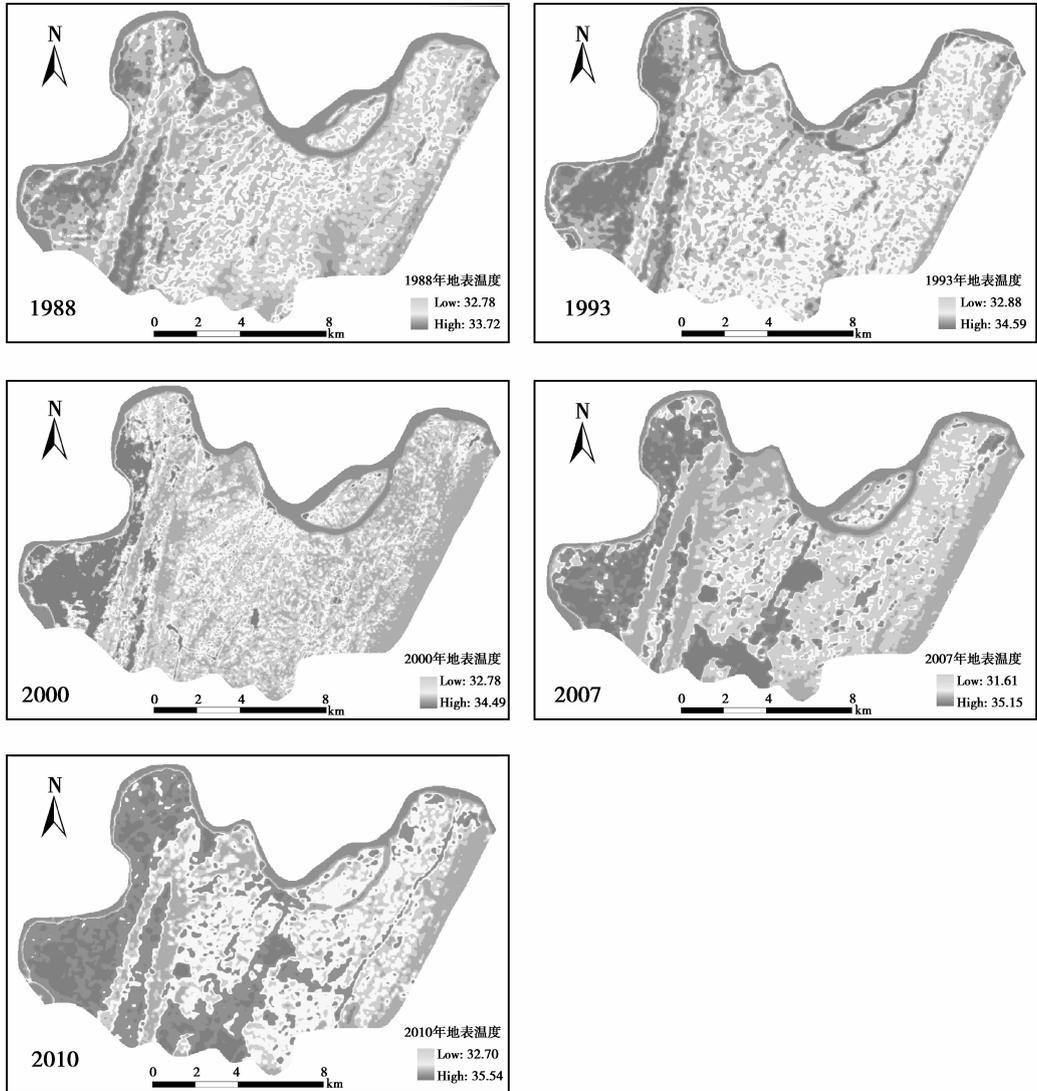


图 2 南岸区 1988—2010 年热环境空间分布图

通过图 2 分析可以得出,从空间分布情况上看,研究区西部片区热岛效应明显高于东部片区。由此看出,地表温度在空间分布上存在一定规律性,城市高温区下垫面多以建设用地为主,城市低温区下垫面多以水域和高植被覆盖为主。从变化趋势上看,1988 年以来,城市热岛现象日益显著,且有向东南方向扩展的趋势。从下垫面变化情况上看,2000 年以后,研究区东部逐渐出现大量农用地转化为建设用地的情况,导致其下垫面被热贡献最高的建设用地所取代,温度明显高于 2000 年以前,且有继续向东南方向扩展的趋势。总体上看,2007 年以前只有研究区西部热岛较为明显,而 2007 年以后研究区逐渐形成东西两个强热岛。由此看出,研究区热岛效应明显加重,且有继续恶化的趋势。

### 3.3 城市热环境对城市扩展响应分析

城市建设用地扩张,在一定程度上决定着下垫面结构,也在一定程度上决定着城市地表温度<sup>[6]</sup>。通过对研究区历年来地表温度反演结果设置阈值,确定热岛区,以计算热岛中心和热岛椭圆(表 2、图 3),并与建设用地重心变化趋势(图 4)进行对比研究。

表 2 不同年份热岛中心椭圆参数

年份	东西标准距离/m	南北标准距离/m	旋转系数
2010	6 198.531 7	5 914.464 9	140.42
2007	6 082.841 4	5 413.369 5	152.41
2000	5 668.818 4	7 481.188 4	67.23
1993	5 471.400 2	7 598.643 8	68.28
1988	3 956.591 7	6 323.228 8	42.72

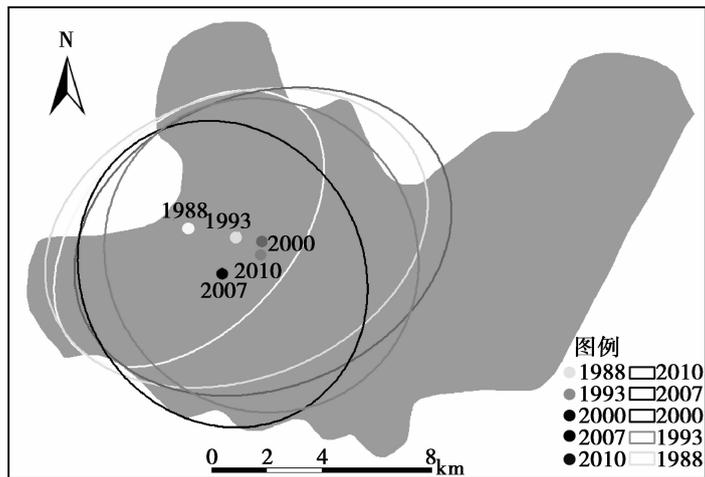


图 3 南岸区历年地表热环境变化趋势椭圆

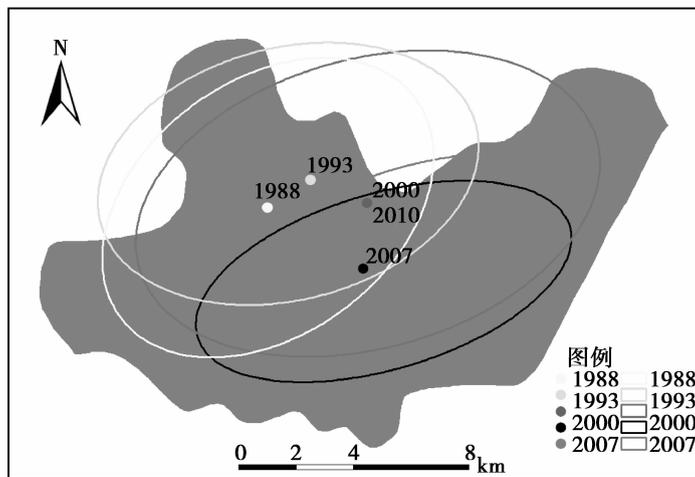


图 4 南岸区历年建设用地重心变化趋势椭圆

根据南岸区重心研究结果表明,建设用地重心在 1988—1993 年和 2007—2010 年两个时间段出现了较大的跨越,而热岛中心在这两个时间段也出现较大的跨越,表明城市扩展与热岛环境在时间尺度上具有较高一致性。根据南岸区重心研究结果表明,建设用地扩展总体上向东南方向移动,而热岛中心研究表明,热岛中心总体上也向东南方向移动,表明城市扩展与地表热环境在空间分布上具有较高一致性;2000 年以前,建设用地位于南岸区西部相对集中,2000 年以后建设用地逐渐出现在南岸区东部,这与热岛椭圆在 2000 年以后东西方向离散程度较大相一致;从热岛中心的迁移来看,高温区受建设用地数量和分布情况影响较大,随

着研究区建设用地重心的东移,热岛中心也随之东移,由于东部建设用地明显小于西部,从而导致西部热岛明显高于东部。

## 4 结论与讨论

利用 1988、1993、2000、2007 和 2010 年的 Landsat TM 影像,对南岸区近 22 年建设用地重心、地表热环境以及城市热岛中心的变化及分布特征进行分析,得出以下结论:

(1) 南岸区建设用地重心向东南方向迁移,迁移速度逐年上升,2010 年达到最大值,速度为 417.2 m/年。

(2) 研究区热岛现象显著,且分布不均匀。随着时间推移,热岛区域面积增加,由 2007 年以前的研究区西部单个热岛区发展成为 2007 年以后的东西两个热岛区。建设用地热贡献最高,水体热贡献最低。虽然研究区内部总温差不大,但有建设用地的区域温度明显高于自然表面温度,水体温度明显低于自然表面温度。

(3) 建设用地的扩展加剧了城市热岛效应。通过不同时期地表温度反演发现,前期为非建设用地,后期变为建设用地的这部分土地温度明显升高。城市热岛中心空间变化与建设用地重心空间变化具有较高的一致性。

此外,在该项研究中,对建设用地扩展研究还不够深入,只采用了 Landsat-TM 数据,数据源单一,对反演地表温度的参数估算仍然存在误差。在今后的研究中,将采用多源数据作为辅助验证,以提高地表温度的准确性。

### 参考文献:

- [1] 肖荣波,欧阳志云,李伟峰,等. 城市热岛的生态环境效应[J]. 生态学报,2005,25(8):2055-2060
- [2] 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,2005,6(9):5-9
- [3] 李俊杰,何隆华,陈杰. 南京城市热场的卫星遥感分析[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(6):760-763
- [4] 陈云浩,史培军,李晓兵,等. 城市空间热环境的研究——热场结构及其演变的分形测量[J]. 测绘学报,2002(3):322-326
- [4] 张穗,何报寅,杜耘. 武汉市城区热岛效应的遥感研究[J]. 长江流域资源与环境,2003,12(5):445-449
- [5] FEI Y,BAUER M E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery [J]. Remote Sensing of Environment,2007,106(3):375-386
- [6] ZHOU Q G,ZHANG Y. Research on Spatial-Temporal Change of Urban Thermal Environment Based on RS:A Case Study of the Chongqing Urban,China[A]. International Conference on Information Technology and Environmental Systems Sciences 2008[C]. 2008:891-895
- [8] 王情,张广录,王晓磊,等. 基于 RS 和 GIS 的城市热岛效应分析——以石家庄市为例[J]. 世界科技研究与发展,2008,30(3):320-323
- [9] 李建辉,周启刚,陈倩,等. 基于 RS 和 GIS 的建设用地变化研究——以重庆市主城九区为例[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2011,29(1):76-81
- [10] 李京忠,殷学勇,蔡清华,等. 基于 TM 影像的地表温度遥感反演研究——以兰州市区为例[J]. 安徽农业科学,2008,36(18):7805-7807
- [11] 叶智威,覃志豪,宫辉力. 洪泽湖区的 Landsat TM6 地表温度遥感反演和空间差异分析[J]. 首都师范大学学报:自然科学版,2009,31(1):88-94
- [12] 刘朝顺,高炜,高志强,等. 基于 ETM + 遥感影像反演不同土地利用类型地表温度的研究[J]. 南京气象学院学报,2008,31(4):503-510
- [13] 丁凤,徐涵秋. TM 热波段图像的地表温度反演算法与实验分析[J]. 地球信息科学,2006,8(3):125-130

- [14] 覃志豪,李文娟,徐斌,等. 利用 Landsat TM6 反演地表温度所需地表辐射率参数的估计方法[J]. 海洋科学进展,2004,22(增刊):129-135
- [15] 吕志强,文雅,孙铮,等. 珠江口沿岸土地利用变化及其地表热环境遥感分析[J]. 生态环境学报,2010,19(8):1771-1777
- [16] 覃志豪. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报,2001,54(4):456-465

## The Influence of Land Surface Thermal Environment on Urban Expansion Based on Landsat TM ——Taking Nanan District of Chongqing as an Example

HU Di-wei<sup>1</sup>, ZHOU Qi-gang<sup>1</sup>, ZHAO Yu-shuang<sup>1</sup>,  
YANG Qin-wen<sup>1</sup>, WANG Hua-wei<sup>2</sup>

(1. School of Tourism and Land Resources, Chongqing Technology and Business University,  
Chongqing 400067, China;

2. School of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University,  
Chongqing 400067, China)

**Abstract:** Since Chongqing became the municipality directly under central government, urban construction has been in rapid development period, and urban heat island effect has become a hot topic of urban ecological issues. Based on Landsat data and vector data of five stages in 1988, 1993, 2000, 2007 and 2010, through dynamic study of barycenter transfer, surface temperature change and heat island center transfer of the construction land of Nanan District, this paper analyzes barycenter transfer process, land surface temperature space distribution difference and heat island center movement feature of the construction land in studied area, the research results show that, in the studied area in 22 years, construction land expansion is obvious, that its barycenter gradually transfers toward southeast direction and the transfer speed is increasing year after year, that land surface temperature space distribution pattern change is significant and urban heat island phenomenon is more and more remarkable, that the underlying surface in urban high temperature region mainly consists of construction land and the underlying surface of urban low temperature region is chiefly composed of waters and highly-populated plant coverage and that urban heat island center space change and construction land barycenter space change are highly consistent. This research result can provide policy reference for urban planning and ecological environment protection.

**Key words:** land surface environment; urban expansion; Landsat TM; construction land

责任编辑:李翠薇