

地表参数反演及城市热岛时空演变分析

王天星¹, 陈松林², 阎广建¹

(1 北京师范大学地理学与遥感科学学院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

2 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007)

摘要: 采用 TES 算法实现了 ASTER 地表温度的反演, 在对发射率估算方法改进基础上, 利用单窗算法反演 1989 年 TM 地表温度。结合 C 地形校正, 利用线性光谱模型提取植被覆盖度与城市不透水面密度, 利用反射率提取 NDVI。从多方面对城市热岛时空演变进行综合研究, 研究表明, 与等间距法相比, 均值 - 标准差法可以较合理地刻画地表热场的分布, 一定程度上可以避免不同时相的差异。最后时空对比及空间统计学分析显示, 1989~2004 年间福州市城市热岛面积、热岛强度都有所增加, 城市热岛总体趋势为西北 - 东南走向, 并逐渐向北 - 南方向偏移, 而且城市热岛重心向东南方向偏移。

关键词: ASTER; TM; 植被覆盖度; 不透水面密度; 地形校正; 线性光谱模型; 城市热岛

中图分类号: TP722.5/P423.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2009)05-0697-06

地表温度对地表能量平衡、辐射平衡、地表蒸散发等具有重要的意义, 在森林火灾监测、热污染、军事等领域得到了广泛应用。植被覆盖度对区域乃至全球环境变化、碳循环、地 - 气水热交换、地表蒸散发等具有重要的影响。对地表温度^[1~6]和植被覆盖度^[7~8]的反演前人做了大量研究, 但由于遥感本身的复杂性及地表的非均一性, 利用遥感准确反演地表参数仍然面临巨大挑战, 利用不同方法、不同数据源对原有模型算法的校验、改进或发展新型算法迫在眉睫。另外, 伴随中国经济及城市化进程的快速发展, 城市规模的不断扩大, 城市硬化地面不断扩大, 物质能量在城市过度集中, 进一步加剧了城市热岛效应, 也给经济社会和谐发展、居民身心健康带来极大负面效应, 引起了社会各界的广泛关注^[9]。城市热岛效应与下垫面参数(植被覆盖度、植被指数、地表反照率、不透水面密度等)密切相关, 是城市热岛研究的重点和难点, 虽然前人做了大量研究^[10~13], 但由于问题本身的复杂性, 现有研究方法和手段仍需不断改进和发展。

福州市自改革开放以来, 经济飞速发展, 另外, 其四周环山的特殊地形条件使得福州市城市热岛效应日益明显。一些学者用 TM/ETM+ 的亮温、景观指数对福州市热岛进行研究, 分析显示福州市具

有明显热岛效应, 并初步分析其成因和对环境的影响^[14~16]。相关研究多采用亮温数据及定性或半定量的分析方法, 因此要准确刻画福州市城市热岛时空演变, 现有方法需不断改进和发展。

本文在对前人研究方法改进基础上提取城市域生物物理参数, 并引进新方法多角度综合分析福州市城市热岛时空演变规律, 以期对相关研究提供思路, 为福州市城市环境监测评价、城市规划等提供实践和理论依据。

1 数据与数据处理

以福州市为研究区, 收集福州市 2004 年 4 月 6 日 ASTER 影像 (L1B AST09_T) 和 1989 年 6 月 15 日 TM 影像。另外, 还收集了研究区 1:10 000 DEM、气象数据及土地利用等数据。对 TM (除 band 6) 和 L1B 数据 (前 9 个波段) 利用 FLAASH 进行大气校正, 将数据转换成反射率, 而 AST_09T 本身为二级产品, 已经进行了大气上行辐射和大气透过率补偿, 无需额外大气校正, 以 ASTER 为基准, 对 TM 进行几何校正, 然后在 ENVI 平台上将多幅影像进行镶嵌和拼接, 然后利用研究区行政边界图层做掩膜, 提取出研究区范围。

收稿日期: 2008-11-20 修订日期: 2009-03-11

基金项目: 国家 973 项目 (2007CB714402)、国家自然科学基金 (40871164) 项目、福建省自然科学基金项目 (2007J0345) 资助。

作者简介: 王天星 (1982-), 男, 山东德州人, 博士, 主要从事地表参数反演及热红外遥感研究。E-mail: watic@163.com

2 地表参数反演与验证

2.1 地表温度反演

前人根据不同影像特点发展大量温度反演算法,包括单窗算法^[1,2]、劈窗算法^[3,4]、TES算法及其他算法^[5]。本文对 ASTER 影像采用 TES 算法^[6],对 TM 采用单窗算法。单窗算法有代表性的主要有辐射传输方程法、Qin et al 单窗算法^[11]、M&S 普适^[12]单窗算法三种,根据 Sobrino et al 的研究^[17],在没有准确大气廓线及比辐射作为输入参数时,M&S 算法可以取得较好的精度。本文采用 M&S 算法,目前针对 TM 的发射率估算代表性的有 NDVI 阈值法^[17]及覃志豪提出的估算方法^[18],NDVI 阈值法主要适用于大尺度或以自然地表为主区域的发射率估算,但没有考虑到建设用地区域的特殊性,而覃志豪估算方法考虑了城市区,二者算法稍有区别,考虑到研究区的特点(城区占大部分),本文综合了二者的优点。将研究区划分成三部分:自然地表、城市用地、水域,由于水体在热红外波段的发射率较高,几乎接近黑体,而且比较稳定,因此直接将水体的发射率设定为 0.995^[17]。

对自然表面,参考 NDVI 阈值法,根据研究区情况将裸土及全植被覆盖区阈值分别修正为 0.2 和 0.55,具体见文献[17];对城市用地区,研究将 NDVI 分成二部分:NDVI < 0.01 为建设用地区,即几乎被水泥、沥青、建筑等覆盖,其发射率设定为 0.97,NDVI ≥ 0.01 为建设用地与植被混合像元,其发射率计算公式参考文献[17]的(8)式,其中 ϵ_s 代表建设用地发射率;在自然地表、城市用地、水域发射率确定基础上,进行空间求和汇总得到研究区地表发射率,结合利用气象数据估算的大气水汽含量,实现地表温度反演,反演流程见文献[19]。

2.2 植被覆盖度与不透水面密度反演

由于混合像元的普遍存在,利用经验回归、植被指数法^[7,8]提取植被覆盖度精度有限而且推广性较差。随着高光谱遥感及像元分解理论的发展,一些像元分解模型被广泛引入植被覆盖度的反演领域,如线性光谱分离模型(Linear Spectral Unmixing - LSU)、几何光学模型、随机几何模型、概率模型等。其中,线性光谱模型需要参数少、简单实用,同时能提供像元内植被分量的面积百分比,是目前应用最广的一种像元分解技术^[20]。

由于研究区北部及东部为山区,其地形起伏使

LSU 的线性假设难于满足,地形起伏容易造成同物异谱或同谱异物现象,给端元光谱的选取和线性光谱分离带来极大不确定性,因此在应用 LSU 前,须对地形进行校正。本文利用 C 校正法^[21,22]对 ASTER 影像进行了地形校正。另外,由于水体比较单一,所占面积不大,为提高 LSU 的分离精度,将水体做了掩膜处理。为了进一步减小相似地物的光谱变异,提高端元选取的准确度,对上述处理后的影像进行了标准化处理^[23],最后通过一系列(Minimum Noise Fraction)MNF^[24]、(Pixel Purity Index)PPI^[25]、N 维散度分析确定了植被、土壤、不透水面三个端元。在端元光谱确定基础上,利用 LSU 进行分解,其中,植被端元对应植被覆盖度,不透水面端元对应不透水面密度图像。

由于缺乏研究区实时地面验证数据,收集研究区 2003 年 KONOS 影像,在影像配准前提下,在端元影像和 KONOS 影像上选取一定数量的点对,选点原则是尽量在季节性差异小或土地利用类型变化较小区域,如,城区、茂密林地区等,以 KONOS 影像上各点为中心进行 15 × 15 缓冲区分析,然后统计每个缓冲区植被覆盖度或不透水面密度(利用像元比例),与端元分量对比,经检验,植被覆盖度和不透水面密度反演结果与实际基本相符。

2.3 NDVI 提取

植被指数可由 DN 值、辐射亮度、反射率三种方式计算,由于反射率考虑太阳角、地形等信息,因此相对较准确。本研究利用经 FLAASH 校正后后的反射率数据计算得到 NDVI。

3 城市热岛时空演变分析

3.1 城市热岛的界定

研究城市热岛涉及地表热场划分或城市热岛界定,常用方法有等间距法^[26,27]和均值 - 标准差法^[28],本文以地表热场划分 5 级为例,对两种方法进行对比。将 2004 年 ASTER 地表温度按照表 1

表 1 均值 - 标准差法划分地表热场等级的方法

Table 1 Classification of land surface thermal fields by

Mean-Standard deviation Method

温度等级	热场划分区间
高温区	$T_s > \mu + \text{std}$
次高温区	$\mu + 0.5\text{std} < T_s \leq \mu + \text{std}$
中温区	$\mu - 0.5\text{std} \leq T_s \leq \mu + 0.5\text{std}$
次中温区	$\mu - \text{std} \leq T_s < \mu - 0.5\text{std}$
低温区	$T_s < \mu - \text{std}$

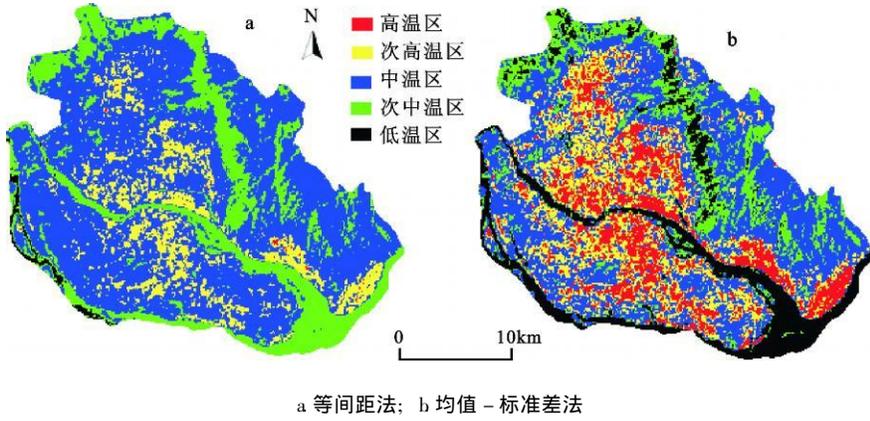


图 1 地表热场划分图

Fig 1 Distribution of land surface thermal field in Fuzhou in 2004

划分 5 级, 高温区和次高温区作为热岛区 (图 1)。

在数量结构上, 等间距法所对应的高温区明显比均值 - 标准差法小, 而且, 前者界定的热岛面积明显小于后者, 这与实际不符, 而均值 - 标准差法界定的热岛几乎和城市范围相当 (包括主城区、快安、马尾等不透水面区); 由于等间距法受温度变异影响较大, 而且中温区过于平均使得其对城市热岛的细节表现力明显不足; 就空间分布而言, 在建成区北部和东部的高山, 受人类活动影响较少, 且植被覆盖度高, 应该属于低温区, 这在均值 - 标准差法中明显体现出来, 而在等间距分级法中却划分为

次中温区, 比均值 - 标准差法高出一个温度级, 显然等间距法不够合理。闽江水体在均值 - 标准差法中表现为低温区, 与实际相符, 而在等间距法中, 水体仍然表现为次中温区, 显然也不够合理。通过对比选用了均值 - 标准差法用于后续研究。

3.2 城市热岛的时空对比分析

根据上述分析, 按照表 1 中的方法分别将 1989 年和 2004 年 LST 影像划分成 5 个等级 (图 2), 将高温区和次高温区作为热岛区 (图 2)。为定量分析城市热岛空间结构, 分别对两期温度等级影像进行统计分析 (表 2)。

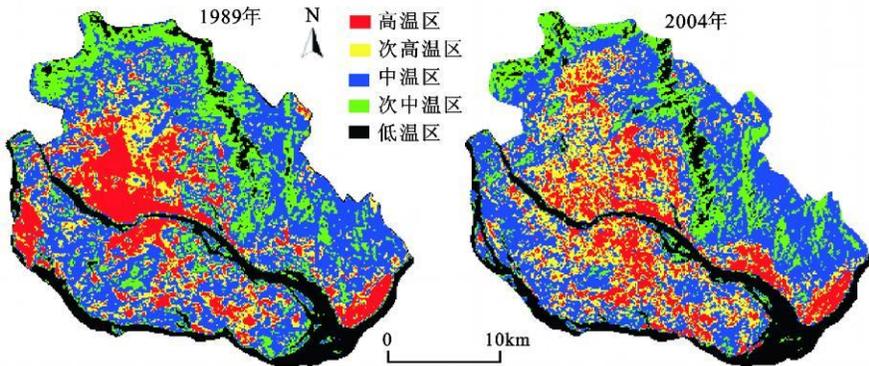


图 2 研究区 1989 和 2004 年地表温度等级划分图

Fig 2 Distribution of land surface thermal field in Fuzhou in 1989 and 2004

表 2 TM 与 ASTER 地表温度等级划分统计信息

Table 2 Statistic information of land surface thermal field of TM and ASTER

年份	占研究区面积百分比 (%)					热岛区	热岛强度 (°C)
	低温区	次中温区	中温区	次高温区	高温区		
1989	12.8	17.38	40.85	13.16	15.81	29.75	5.13
2004	13.73	13.54	39.25	19.00	14.48	33.48	6.96
变化率	0.93	-3.84	-1.60	5.84	-1.33	4.51	1.73

注: 热岛强度为热岛区平均温度与非热岛区平均温度的差值

图 2 可以看出, 1989-2004 年城市热岛基本对应了建成区部分, 而建成区部分主要受高温区和次高温区的控制, 表 2 显示: 热岛区在 15 a 间增长了 4.51%, 同时热岛强度从 1989 年的 5.13°C 增大到了 2004 年的 6.96°C, 上升了 1.73°C, 可见, 随着城市化进程的加快, 福州市城市热岛效应具有增强的趋势。

为深入分析城市热岛时空变化特征, 用 Arc-

GIS 9.0 生成覆盖研究区的规则格网并与 LST 叠加, 用文献 [27] 的方法构建热力强度指数 (式 1):

$$R = \sum_{i=1}^n \dot{p}_i \quad (1)$$

用 ArcGIS 地统计模块对两期影像对应的热力强度指数进行探索性数据分析 (图 3)。其中, R 为热力强度指数, P_i 为第 i 级热力景观所占格网单元的面积百分比。

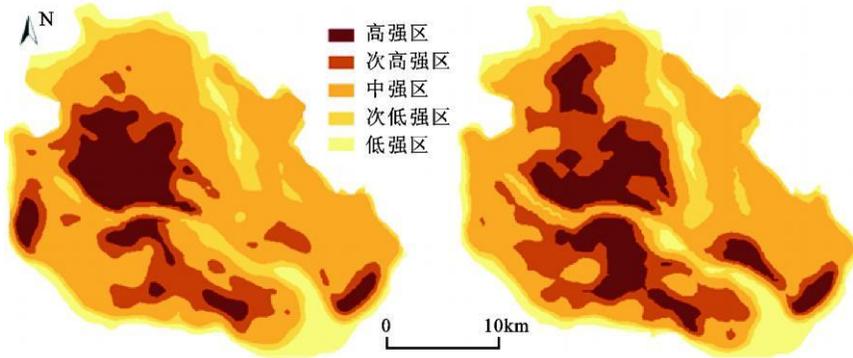


图 3 热力强度指数模拟图

Fig 3 Simulated image of thermal intensity

为更直观分析城市热岛演变趋势, 计算福州市 1989 和 2004 年城市热岛的趋势椭圆 (标准差椭圆) 和热岛重心 (图 4)。图 4 中, 趋势椭圆的长轴方向代表城市热岛的主要发展方向。结果显示, 1989 年高强区主要对应主城区, 另外, 还包括对湖、仓前、城门、马尾及金山附近沙滩裸地, 次高强区主要分布在高强区周围、六一南路-城门轴线附近、快安等地; 2004 年高强区主要集中在新店、台江区、晋安及仓前、下渡、三叉街-盖山投资区-城门投资区轴线区域、马尾、快安等地, 次高强区除分布在高强区周围外, 新店与主城区交界处及南台岛金山等地有不同程度分布 (高盖山周围)。与 1989 年相比, 2004 年新店、快安、临江、下渡、义序、城门等地热岛效应明显增强, 相反, 研究区左下方建新镇靠近闽江水体区域 15 a 间由于土地利用覆被发生巨大变化, 加上河道变迁、人为开发等影响, 温度有所降低; 左海公园、西湖公园等绿色植被及水体的增加使得鼓楼区温度有所下降, 由 1989 年高强区转化为 2004 年的次高强区。总体上, 1989~2004 福州市城市热岛除西部外各方向有不同程度发展。图 4 可看出福州市城市热岛整体发展趋势呈现西北-东南方向, 且逐渐向北-南方向靠拢,

主要受到新店、仓山城市热岛效应增强的影响; 城市热岛重心向东南方向移动, 这与福州市总体规划“东扩南进”政策不无相关。

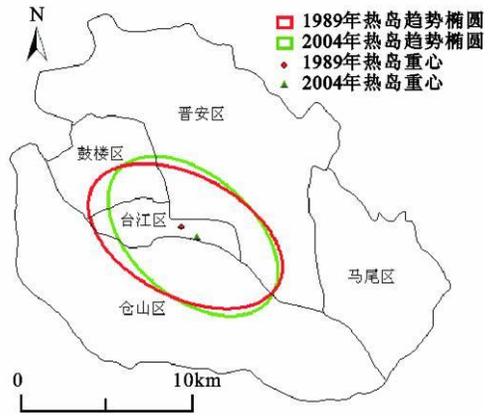


图 4 福州市城市热岛重心与热岛趋势椭圆

Fig 4 Mean center and standard deviation ellipses of urban heat island in Fuzhou

4 结论与讨论

本文在前人研究基础上, 侧重城市域地表参数的定量反演, 并以 ASTER、TM 为数据源反演了地表温度、植被覆盖度、不透水面密度等参数; 在地表

参数反演基础上,从多个角度定量分析了福州城市热岛的时空演变规律,本研究是对地表参数反演及城市热岛研究原有理论和方法的补充和发展,同时也为相关研究提供新的研究思路。研究所得主要结论如下:(1)研究相继对影像进行了地形订正、光谱标准化,从而一定程度上减小了光谱变异,为准确选取端元光谱提供了保障。另外,水体光谱比较单一,而且水体包含其他端元(植被、土壤等)的可行性极小,本文将水体掩膜掉,在此基础上提取端元光谱,进一步提高了端元光谱提取精度。(2)在对城市热岛的界定上,在数量结构、空间分布两方面对均值-标准差法与间距分级法进行了对比,结果表明:均值-标准差法在对分级数的敏感性、所界定热岛的空间分布和温度变异的细节表现力等方面,都优于等间距分级法。另外,均值-标准差法以平均温度和标准差倍数的关系为切入点,以地物温度对平均温度的变异程度为划分的依据,因此,在不同时相城市热岛演变、对比研究中,一定程度上可以避免不同时相的差异。(3)利用热力强度指数模拟所得预测图从另外角度可以直观的反映城市热岛效应的时空变化,城市热岛效应明显增强的区域分布在新店、仓山、快安等新兴投资区和工业区。另外,城市热岛趋势椭圆显示,1989~2004年城市热岛总体趋势为西北-东南走向,并逐渐向北-南方向偏移,而且城市热岛重心向东南方向偏移,反映了福州市城市总体规划的政策影响,同时也显示了地统计方法在城市热岛领域应用的可行性、有效性。

参考文献:

- [1] Qin Z, Kamali A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieval land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**(18): 3719-3746.
- [2] Jimenez-Mufoz J C, Sobrino I A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(22): 1677-1688.
- [3] Kerr Y H, Lagouarde J P, Imbemon J. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, **41**: 197-209.
- [4] 张 霞,朱启疆,阎祥军.反演陆面温度的分裂窗算法与应用分析 [J]. *中国图象图形学报*, 1999(7): 595-599.
- [5] 唐世浩,李小文,王锦地,等.改进的基于订正 ALPHA 差值谱的 TES 算法 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2006, **36**(7): 663-671.
- [6] Gillespie A, Rokugawa S, Matsunaga T, et al. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images [J]. 1998, **36**(4): 1113-1126.
- [7] 王爱玲,朱文泉,李 京,等.内蒙古生态系统服务价值遥感测量 [J]. *地理科学*, 2007, **27**(3): 325-330.
- [8] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算 [J]. *资源科学*, 2004, **26**(4): 154-156.
- [9] 李国栋,王乃昂,张俊华,等.兰州市城区夏季热场分布与热岛效应研究 [J]. *地理科学*, 2008, **28**(5): 709-714.
- [10] 岳文泽,徐丽华.城市土地利用类型及格局的热环境效应研究——以上海市中心城区为例 [J]. *地理科学*, 2007, **27**(2): 243-248.
- [11] 刘 宇,匡耀求,吴志峰,等不同土地利用类型对城市地表温度的影响——以广东东莞为例 [J]. *地理科学*, 2006, **26**(5): 597-602.
- [12] 陈浩浩,李晓兵,史培军,等.上海城市热环境的空间格局分析 [J]. *地理科学*, 2002, **22**(3): 317-323.
- [13] Dengsheng Lu, Qihao Weng. Spectral mixture analysis of ASTER images for examining the relationship between urban thermal features and biophysical descriptors in Indianapolis, Indiana, USA [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **104**(2): 157-167.
- [14] 黄荣峰.城市土地利用与城市热环境互动关系的遥感研究 [D]. 福州大学, 2005.
- [15] 王 琳.福州及其毗邻地区的土地利用变化、城市热岛和蒸发(散)量遥感信息反演的研究 [D]. 福州大学, 2005.
- [16] 郑朝洪,张 岸,邓娴芬,等.福州市热岛效应的监测与探讨 [J]. *城市管理与科技*, 2004, **6**(3): 103-105.
- [17] Sobrino J A, Jimenez-Mufoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**(4): 434-446.
- [18] 覃志豪,李文娟,徐 斌,等.陆地卫星 TM 6 波段范围内地表发射率的估计 [J]. *国土资源遥感*, 2004, (3): 28-32.
- [19] 王天星.地表参数遥感定量反演及其在城市热环境研究中的应用 [D]. 福建师范大学, 2008.
- [20] Chabrilat S, Pinet P C, Ceuleneer G, et al. Ronda peridotite massif methodology for its geological mapping and lithological discrimination from airborne hyperspectral data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, **21**(12): 2363-2388.
- [21] Teillet P M, Guindon B, Goodenough D G, et al. On the Slope-Angle Correction of Multispectral Scanner Data [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1982, **8**(2): 84-106.
- [22] Meyer P, Itten K, Kellenberger T. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment [J]. *SPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1993, **48**(4): 7-28.
- [23] Wu C. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using EIM+ imagery [J]. *Remote Sensing of Envi-*

- ment 2004 **93**(4): 480– 592.
- [24] Boardman JW, Kruse F A. Automatic spectral analysis geological example using AVIRIS data North Grapevine Mountain, Nevada[M]. //10th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing vol 1, Ann Arbor Michigan, ERM, 9– 12, May, 1994: 407– 418.
- [25] Boardman JW. Automating spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts[J]. Summaries the 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop Pasadena JPL publication 1993 (1): 11– 14.
- [26] 张勇, 余涛, 顾行发, 等. CBERS-02 IRMSS热红外数据地表温度反演及其在城市热岛效应定量化分析中的应用[J]. 遥感学报, 2006 **10**(5): 790– 796.
- [27] 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[J]. 遥感技术与应用, 2003 **18**(3): 129– 131.
- [28] 张金区. 珠江三角洲地区地表热环境的遥感探测及时空演化研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2006.

Estimation of Land Surface Parameters and Spatio-temporal Characteristics of Urban Heat Island

WANG Tian-xing¹, CHEN Song-lin², YAN Guang-jian¹

(1. School of Geography, Beijing Normal University; State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing 100875

2. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007)

Abstract Fuzhou was chosen as the study site, land surface temperatures were estimated from both ASTER images acquired on April 6, 2004 and Landsat TM image collected on June 15, 1989. Then the linear spectral unmixing-LSU model was used to estimate the vegetation abundances and percent of impervious surface from ASTER images. Before employing the LSU, the water body within the study area was masked and the C-terrain correction was applied to the images. Subsequently the NDVI images were also calculated using reflectance data of TM. With the inversion of land surface parameters mentioned above, the spatio-temporal changes of urban heat island (UHI) in Fuzhou from 1989 to 2004 were analyzed in various aspects. Comparisons between different methods used to determine the scopes of urban heat island showed that the mean-standard deviation method was more suitable for studying UHI than equal-interval method. Based on the researches discussed above, the dynamic changes of urban heat island were investigated and the spatial statistics technology was then introduced, results indicated that after 15 years, the area extent of UHI was significantly enlarged and the urban heat intensity was also augmented, moreover, the standard deviation ellipse indicated that the center of UHI was moved towards southeast, which is in line with the planning policy of Fuzhou.

Keywords ASTER; TM; vegetation abundance; percent of impervious area; terrain correction; linear spectral unmixing model; urban heat island