



论 文

HJ-1B 卫星遥感数据在重庆市城市热环境监测的应用分析

罗小波*, 刘明皓

重庆邮电大学计算机学院, 重庆 400065

* 通信作者. E-mail: luoxb@cqupt.edu.cn

收稿日期: 2011-08-05; 接受日期: 2011-08-29

国家自然科学基金 (批准号: 40871175) 和重庆邮电大学自然科学基金 (批准号: A2008-21, A2010-16) 资助项目

摘要 本文以 MODIS 反演大气透射率, 以 HJ-1B/CCD 分类结果反演地表比辐射率, 并基于单窗算法, 利用 HJ-1B/IRS4 数据反演地表温度. 在此基础上, 提取研究区的热场变异指数来分析重庆热岛空间分布特征, 并就 NDVI 与 NDBI 对热岛效应的影响进行了分析. 其结果如下: 1) 重庆城市热岛大致位于中梁山、铜锣山之间, 呈东北、西南走向分布; 2) 热岛中心不在市中心, 而是集中在大渡口工业园区、江北机场这些能耗大、人口密集区域, 热岛强度范围在 5°C – 10°C 之间; 3) 接近长江、嘉陵江水域的建筑用地密集区域, 其热岛效应并不明显; 4) NDVI 与热岛强度呈负相关关系, NDBI 与热岛强度呈现较为明显的正相关关系, 二者对热岛都有重要影响, 而 NDBI 的影响更大. 因此, 利用 HJ-1B 数据监测城市热环境, 能较好地揭示重庆城市热岛空间分布特征, 为城市环境监测与改善提供参考.

关键词 HJ-1B 单窗算法 地表温度 城市热岛效应

1 引言

监测和评估城市热岛分布以及影响作用, 对改善城市小气候和生态环境、气象预报、城市规划等方面, 具有重要的科学意义和实用价值. 而对于素有“火炉”之称的重庆而言, 掌握其城市热岛空间分布规律、降低热岛效应影响, 已经成为解决重庆市城市环境问题的一项迫切需要.

目前, 热红外遥感技术已经成为城市热岛监测、分析的有力手段, 国内外学者对此进行了大量的研究. Price^[1] 首次用数学模型描述了卫星遥感影像中的植被指数、土壤湿度和辐射温度之间的三角关系. Carlson 等^[2] 利用卫星遥感数据研究了 Costa Rica, San Jose 地区的城市化及其对热带雨林的影响. Streuker^[3] 研究了美国 Houston 的城市热岛并讨论了城市热岛强度与郊区温度、城市热岛空间分布与城市热岛强度和郊区温度之间的关系. Weng 等^[4] 利用 Landsat ETM+ 反演了 LST 和 NDVI, 并籍此研究了美国 Indianapolis 城市热岛, 获得了很好的效果. Weng 等利用光谱混合分析技术提取城市不透水面和植被覆盖信息, 研究了 Indianapolis 1991–2000 年城市化过程中城市不透水面和植被覆盖变化对陆地表面温度的影响^[5]. Marc 等^[6] 利用 3 个周期 (2003–2005) 基于 TM 的不透水表面 (ISA) 与基于 MODIS 的地表温度 (LST), 对在美国大陆人口最多的 38 个城市进行空间分析, 来评估城市热

岛强度, 以及与开发强度、大小、生态环境的关系. Zhou 等^[7] 利用气象和 TM 卫星对上海市的热力分布特征和变化进行了动态监测和分析. Chen 等^[8] 在遥感定量反演城市热环境的研究中引入了分形几何, 并构建了 3 种不同的模式来分析上海市 20 世纪 90 年代城市热环境信息及其变化. Yan 等^[9] 采用 2003–2005 年 MODIS 数据, 运用分裂窗算法定量反演了上海市地表温度, 以间接反映城市热岛的变化规律. He 等^[10] 利用气象站逐小时的观测数据和地形高程数据等资料, 对重庆市夏季的城市热岛效应进行了分析.

从上述研究可以看出, 目前热环境监测研究的数据源主要为 AVHRR, MODIS, TM/ETM+ 等数据. 但是, 由于重庆多云多雾、地形复杂, 这些数据都不适合于重庆市热环境监测的实际应用要求. 例如, MODIS 的时间分辨率为 1 天, 但是其空间分辨率为 1 km, 远满足不了重庆这样地形复杂的地区; TM 热红外波段空间分辨率为 120 m, 能较好地反映热环境细节, 但是其时间分辨率为 26 天, 而重庆多云多雾, 实际应用中很难获取到需要的数据.

HJ-1B 是 2008 年成功发射的国产卫星, 其热红外波段 IRS4 的空间分辨率为 300 m, 可以基本上满足重庆市热环境监测空间尺度上的要求, 而 4 天的获取周期, 虽然不能保证一定就能获取到需要的数据, 但是要比时间分辨率为 26 天的 TM 获取到需要的数据的可能性大得多. 从空间、时间分辨率看, HJ-1B 数据是目前适合于重庆市热环境监测较为理想的遥感数据.

本文以 HJ-1B 数据为主要数据源, 借鉴单窗算法反演地表温度, 进一步分析重庆市城市热岛空间分布特征, 并对其热岛成因进行初步分析, 为城市的合理规划与改建、工业布局、城市绿化规划、环境保护、热岛预报等提供参考.

2 研究区域与数据源

重庆地形以低山、丘陵为主, 有“山城”之称. 属亚热带季风性湿润气候, 年平均气温在 18°C 左右, 冬暖夏热、无霜期长、雨量充沛、湿润多阴、雨热同季. 重庆市区总人口 382 万, 是我国三大“火炉”城市之一, 也是我国重要的钢材及有色金属、能源化工、汽车及摩托车等生产基地之一. 重庆主城区主要位于中梁山与铜锣山之间, 长江、嘉陵江环绕其中. 本次研究区域包括重庆市主城九区及其郊区, 面积大约 3154 km², 具体分布如图 1 所示.

实验数据为 2010 年 7 月 31 日的 HJ-1B, 包括 HJ-1B/CCD, 为可见光 - 近红外数据, 空间分辨率为 30 m; HJ-1B/IRS4, 为热红外数据, 分辨率为 300 m; 以及 MODIS 1B 数据, 其分辨率为 1 km. 另外研究中还使用了土地利用现状图、气象数据等辅助数据.

3 研究方法

HJ-1B/IRS4 和 TM6 的波段范围非常相近, 因此借鉴 Qin(覃志豪)^[11] 提出的针对 TM6 的单窗算法对 HJ-1B/IRS4 进行地表温度反演. 在此基础上, 提取重庆城市热岛空间分布, 并对热岛成因进行初步分析.

3.1 地表温度反演

(I) 单窗算法及系数修订.

基于热辐射传输方程, 参考覃志豪^[11] 提出的单窗算法, HJ-1B/IRS4 的地表温度反演公式如下:

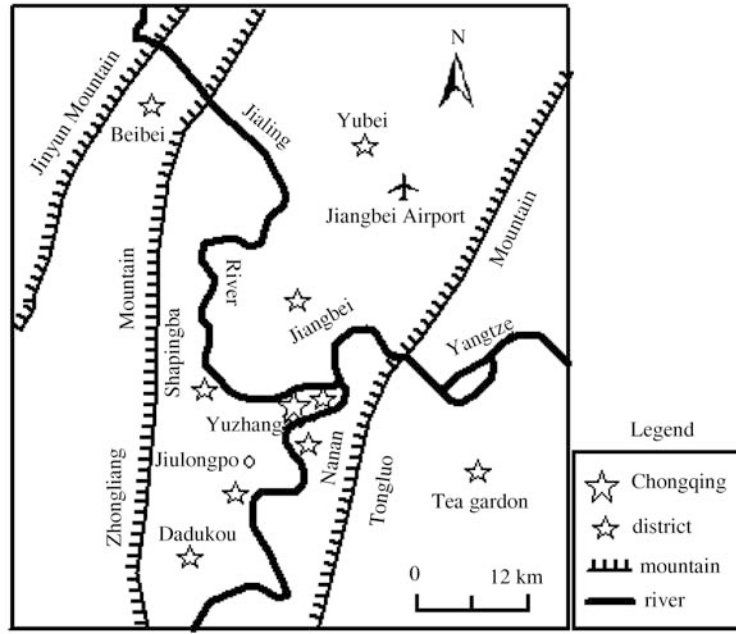


图 1 研究区示意图

Figure 1 Schematic diagram of the study area

$$\begin{cases} T_s = [a(1 - C - D) + (b(1 - C - D) + C + D)T_a - DT_a]/C, \\ C = \varepsilon\tau, \\ D = (1 - \tau)(1 + (1 - \varepsilon)\tau). \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中, T_s , T , T_a 分别为地表温度、亮度温度、大气平均作用温度, 单位为 K ; ε , τ 分别为地表比辐射率、大气透射率; a , b 为常数, 根据温度变量 $L = B(T)/(\partial B(T)/\partial T)$ 与 T 回归拟合得到, 对于 TM6, 在 0°C – 70°C 范围内时, $a = -67.356$, $b = 0.459$.

由于 IRS4 与 TM6 通道响应函数不一致, 系数 a 和 b 需要重新估计. 根据 L 表达式, 并考虑 IRS4 的通道响应函数 $f(\lambda_i)$, 可将 L 表述为

$$L = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i T^2 \exp(c_2/\lambda_i T - 1)}{c_2 \exp(c_2/\lambda_i T)} f(\lambda_i) \right) / \sum_{i=1}^n f(\lambda_i). \quad (2)$$

采用中国资源卫星应用中心 2010 年公布的 IRS4 通道响应函数, 取波长间隔 $0.01 \mu\text{m}$, 拟合得到 T 在不同范围时与 L 之间的线性关系如下:

温度在 0°C – 70°C 范围变化时, 系数 $a = -69.034$, $b = 0.4683$, $R^2 = 0.9994$; 当温度变化范围较窄, 为 0°C – 30°C 时, $a = -61.819$, $b = 0.4433$, $R^2 = 0.9999$; 对于 20°C – 50°C , $a = -69.329$, $b = 0.4685$, $R^2 = 0.9999$.

(II) 比辐射率估计.

从卫星像元尺度来看, 地球表面主要包括自然表面、城镇和水体 3 种类型, 其中, 自然表面与城镇的比辐射率 ε 可表示如下 [12]:

$$\varepsilon = P_V R_V \varepsilon_V + (1 - P_V) R_X \varepsilon_X + d\varepsilon. \quad (3)$$

式 (3) 中, $\varepsilon_V, \varepsilon_X$ 为植被、裸土或者建筑表面的比辐射率, R_V, R_X 为植被、裸土或建筑表面温度比率, P_V 为植被覆盖度.

$d\varepsilon$ 为植被与裸土或者建筑表面之间的热辐射相互作用量, 根据 P_V 估计得到, 本文将其经验公式统一为

$$d\varepsilon = 0.0038 \cdot \min\{P_V, 1 - P_V\}. \quad (4)$$

(III) 大气参数估计.

单窗算法需要的大气参数包括大气透过率与大气平均作用温度, 其中, 大气透过率的变化主要取决于大气水汽含量的动态变化. 考虑到重庆属于中纬度地区^[13], 大气透过率与大气平均作用温度估计如下:

$$\begin{cases} \tau = 0.9821 - 0.1241w, \\ T_a = 20.43072 + 0.90507T_0, \end{cases} \quad (5)$$

式中, T_0 为近地面 (大约 1.5 m) 平均气温, 可由当地气象部门提供, w 为大气水汽含量, 用同时相的 MODIS 数据反演得到^[14], 计算公式如下:

$$w = \left[\frac{\alpha - \ln(\rho_{19}/\rho_2)}{\beta} \right]^2, \quad (6)$$

其中 α 和 β 是常量, 分别取 $\alpha = 0.02, \beta = 0.6531$, ρ_{19}, ρ_2 分别为 MODIS 第 19 和 2 波段的地面反射率.

3.2 热环境监测与分析

对于重庆城市热环境监测与分析, 主要基于热场变异指数分析热岛效应空间分布特征, 并对热岛效应的成因进行初步分析.

(I) 热场变异指数与热岛效应分布.

在地表温度反演的基础上, 利用热场变异指数^[15]对重庆热岛效应空间分布进行定量分析, 热场变异指数定义为

$$HI = (T_s - T_{\text{mean}})/T_{\text{mean}}. \quad (7)$$

式 (7) 中, T_s, T_{mean} 分别表示地表温度与地表温度平均值. HI 表示热场变异指数, 是一个基于地表温度的相对变量, 值越大, 热岛效应越明显, 相对于地表温度, 能更好地描述城市热岛效应.

然后, 对热场变异指数分级, 反映热岛效应的空间分布, 热场变异指数的分级标准根据实际情况确定. 本文将热场变异指数分为 4 级, 分级标准如下:

$$\begin{cases} HI \leq 0, & \text{表示无热岛效应;} \\ 0 < HI \leq 0.1, & \text{表示弱热岛效应;} \\ 0.1 < HI \leq 0.2, & \text{表示次强热岛效应;} \\ 0.2 < HI, & \text{表示强热岛效应.} \end{cases} \quad (8)$$

(II) 热岛效应成因分析.

对于热岛效应成因分析, 主要考虑归一化植被指数 (NDVI) 与归一化建筑指数 (NDBI) 两个因素对城市热岛的影响.

NDBI 是 Zha 等^[16]在仿归一化植被指数基础上提出的,它可以较为准确地反映建筑用地信息,数值越大表明建筑用地比例越大,建筑密度越高.其表达式为

$$\text{NDBI} = (\text{MIR} - \text{NIR})/(\text{MIR} + \text{NIR}), \quad (9)$$

式中, MIR 为中红外波段, NIR 为近红外波段. 对于 HJ-1B 而言, 中红外波段为 IRS2, 波长范围 1.55–1.75 μm , 近红外波段为 CCD4, 波长范围 0.76–0.90 μm . 因此, 本文利用 IRS2 与 CCD4 来提取 NDBI.

在提取 NDVI, NDBI 之后, 用热场变异指数表示热岛强度, 生成散点图, 并将异常点剔除, 分别对其进行线性回归, 从而分析 NDVI 与 NDBI 对城市热岛的影响.

4 实验与分析

实验中的 HJ-1B 数据由中国资源卫星应用中心的网站下载获得, 数据获取时间是北京时间 2010 年 7 月 31 日 11 点 47 分, MODIS 1B 数据的获取时间为同一天的 11 点 10 分. 研究区当天天气晴朗, 云量少, 适于地表温度反演实验. 根据沙坪坝气象站数据, 11 点 40 分的气温为 33.5°C, 由于只有这一数据可用, 并且研究区域不大, 因此将整个研究区域的气温近似为 33.5°C.

实验平台主要为 ENVI 与 VC++ 6.0, 地表温度反演主要在 VC++ 6.0 中实现, 结果保存为 ENVI 支持的 dat 格式, 城市热环境分析在 ENVI 中完成. 按照前述研究思路, 反演得到研究区 177×198 像元大小的地表温度、热场变异指数分布, 分别如图 2 和 3 所示.

从图 2 统计不同地表类型的地表温度, 城区温度主要分布在 30°C–39°C 之间, 平均温度 33.6°C; 郊区主要为自然表面, 温度分布在 25°C–30°C 之间, 平均温度 27.3°C; 水体温度最低, 变化小, 分布在 19°C–23°C 之间, 平均温度 22.4°C. 根据文献 [17] 中关于热岛强度的定义, 建成区中所有像素与研究区陆域平均温度的最大差值, 即 $I = \max(T_{\text{ui}} - T_{\text{a}})$, 研究区最高温度 39.4°C, 陆域平均温度 29.2°C, 研究区的热岛强度为 10.2°C, 热岛强度较为明显.

图 3 为热场变异指数分布, 其空间分布特征与图 2 一致, 但对热岛效应的描述更为直接, 一般值小于 0 表示无热岛效应, 值越大热岛效应越明显.

根据热场变异指数分级标准, 将热场变异指数分为强热岛效应、次强热岛效应、弱热岛效应、无热岛效应 4 级, 得到重庆城市热岛空间分布, 如图 4 所示.

从图 4 可以看出, 重庆郊区主要为无热岛效应区域, 强热岛、次强热岛主要集中在主城区, 其面积分别为 116.55 和 363.87 km^2 . 结合图 1, 进一步分析重庆热岛效应, 呈以下规律: 1) 重庆的城市热岛大致沿中梁山、铜锣山走势, 呈东北、西南走向分布; 2) 主城区“热岛效应”的中心并不在建筑物密集的市中心区域——解放碑, 而是集中在大渡口的工业园区、江北机场这些能耗大、人口密集区域; 3) 接近长江、嘉陵江水域的建筑用地密集区域, 如渝中区, 其热岛效应并不明显.

最后对城市热岛效应的成因进行初步分析, 主要考虑 NDVI, NDBI 与城市热岛的关系. 利用 ENVI 的波段运算功能, 得到研究区 NDVI 与 NDBI 的空间分布, 如图 5 和 6 所示.

热场变异指数能较好地描述热岛效应强度, 因此从 NDVI, NDBI 与热场变异指数之间的关系初步探讨重庆热岛成因. 首先生成 NDVI, NDBI 与热场变异指数散点图, 并剔除其中的异常点, 分别进行线性回归, 拟合 NDVI, NDBI 与热场变异指数的线性关系, 结果分别如图 7 和 8 所示.

从图 7 可以看出, 重庆市植被指数 NDVI 与热岛效应强度呈负相关关系, NDVI 每增加 0.1, 热场变异指数降低 0.018, 其 R^2 为 0.48. 从图 8 则可以发现, NDBI 与热岛效应强度呈现较为明显的正相

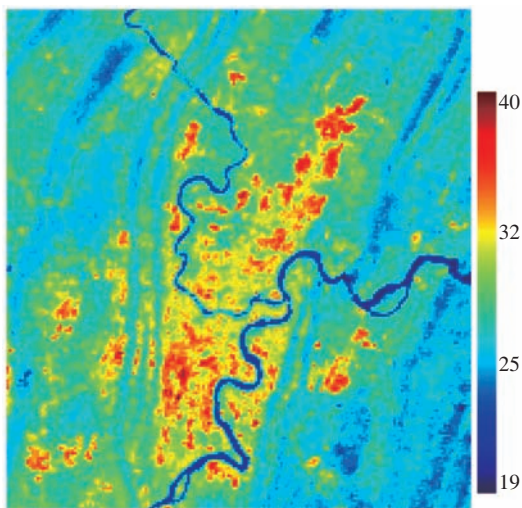


图 2 重庆地表温度分布 (°C)

Figure 2 The land surface temperature distribution of Chongqing (°C)

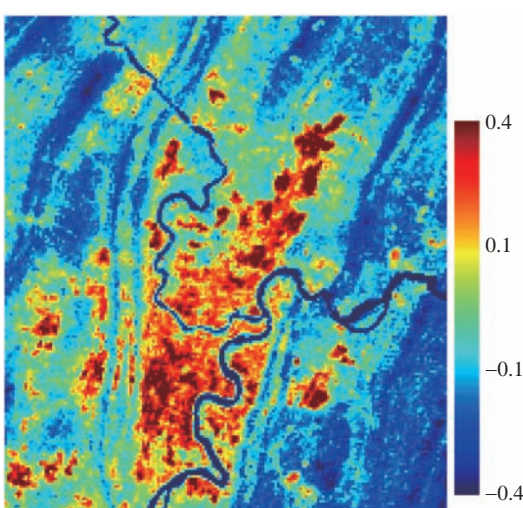


图 3 重庆热场变异指数分布

Figure 3 The thermal field variation index distribution of Chongqing

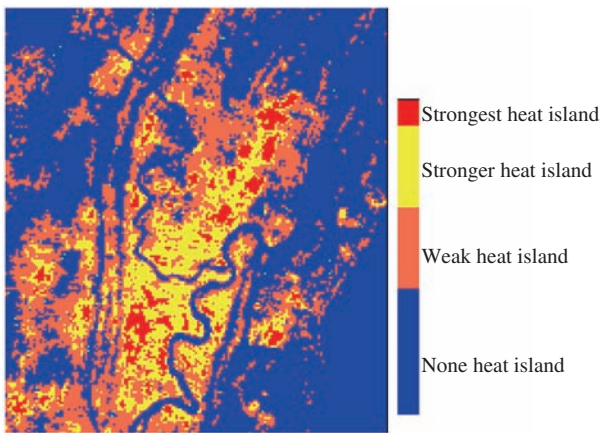


图 4 重庆热岛效应分布

Figure 4 The urban heat island effect distribution of Chongqing

关关系, NDBI 每增加 0.1, 热场变异指数将增加 0.056, 其 R^2 达到了 0.68. 因此, NDVI 与 NDBI 对重庆市热岛效应都有重要影响, 而 NDBI 影响更大, 是影响热岛效应的主要因素.

5 结论

本文基于单窗算法, 利用 HJ-1B/IRS4 数据反演地表温度. 在此基础上, 提取研究区的热场变异指数与城市热岛, 分析重庆热岛空间分布特征, 并从 NDVI 与 NDBI 对热岛效应的影响两个方面对热岛效应成因进行了初步分析. 其实验结果如下:

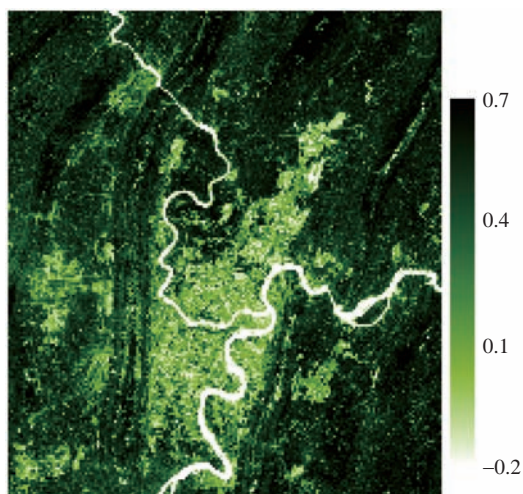


图 5 重庆 NDVI 分布

Figure 5 The NDVI distribution of Chongqing

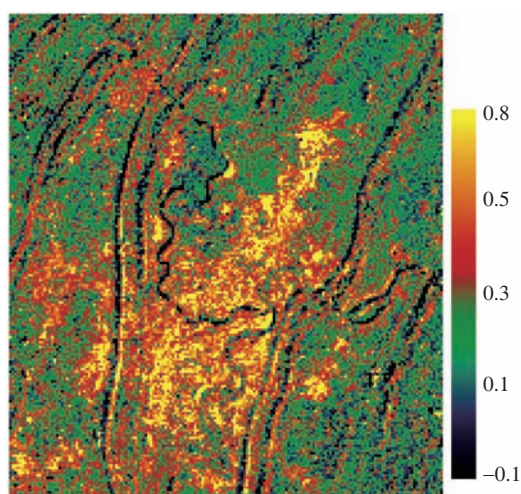


图 6 重庆 NDBI 分布

Figure 6 The NDBI distribution of Chongqing

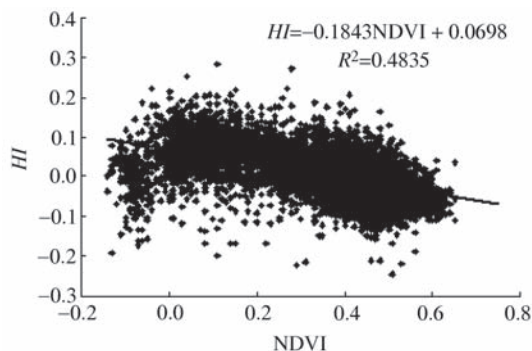


图 7 热场变异指数与 NDVI 的关系

Figure 7 The relationship between thermal field variation index and NDVI

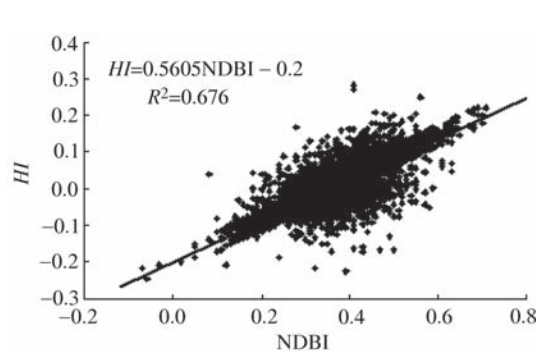


图 8 热场变异指数与 NDBI 的关系

Figure 8 The relationship between thermal field variation index and NDBI

(1) 重庆城市热岛强度范围在 5°C – 10°C 之间, 热岛效应较为明显.

(2) 城市热岛大致沿中梁山、铜锣山走势, 呈东北、西南走向分布; 热岛中心不在市中心区域, 而是集中在大渡口的工业园、江北机场这些能耗大、人口密集区域; 长江、嘉陵江水域附近的建筑用地密集区域, 由于水域对热岛具有缓解作用, 其热岛效应较弱.

(3) NDVI 与热岛强度呈负相关关系, NDBI 与热岛强度呈现较为明显的正相关关系, NDVI 与 NDBI 对城市热岛都有重要影响, 而 NDBI 的影响更大.

因此, 利用 HJ-1B 数据监测城市热岛, 能较好地揭示重庆城市热岛空间分布规律, 为城市建设规划、环境保护、热岛预报等提供重要依据.

本文在地表温度反演中没有考虑地形影响, 在热环境分析中没有考虑动态演变, 这两方面需要加强, 也是本文需要进一步研究的问题.

参考文献

- 1 Price J C. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA/AVHRR. *J Geogr Res*, 1984, 89: 7231–7237
- 2 Carlson T N, Arthur S T. The impact of land use-land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective. *Global Planet Change*, 2000, 25: 49–56
- 3 Streuker D R. A remote sensing study of the urban heat island of Huston, Texas. *Int J Remote Sens*, 2002, 23: 2595–2608
- 4 Weng Q H, Lu D S. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sens Environ*, 2004, 89: 467–483
- 5 Weng Q, Lu D S. A sub-pixel analysis of urbanization effect on land surface temperature and its interplay with impervious surface and vegetation coverage in Indianapolis, United States. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*, 2008, 10: 68–83
- 6 Marc L, Imhoff X, Zhang P, et al. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sens Environ*, 2010, 114: 504–513
- 7 Zhou H M, Zhou C H, Ge W Q, et al. The surveying on thermal distribution in urban based on gis and remote sensing(in Chinese). *ACTA Geogr Sin*, 2001, 56: 189–196
- 8 Chen Y H, Shi P J, Li X B, et al. Research on urban spatial thermal environment using remote sensing image-fractal measurement of thermal field structure & its change (in Chinese). *ACTA Geod Et Cartogr Sin*, 2002: 322–326
- 9 Yan F, Qin Z H, Li M S, et al. Research on urban heat island of Shanghai city from MODIS data (in Chinese). *Geomatics Inf Sci Wuhan Univ*, 2007, 32: 576–579
- 10 He Z N, Li Y H, Chen Z J, et al. Analysis of the urban heat island in 2006 summer in Chongqin G CITY (in Chinese). *J Trop Meteorol*, 2008, 24: 527–534
- 11 Qin Z H, Zhang M H, Arnon Karnieli, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM 6 data (in Chinese). *ACTA Geogr Sin*, 2001, 56: 456–465
- 12 Qin Z H, Li W J, Xu B, et al. The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6 (in Chinese). *Remote Sens Land Resourc*, 2004, (3): 28–32
- 13 Duan S B, Lian G J, Qian Y G, et al. The two single-channel algorithms using simulated HJ-1B data to inverse land surface temperature(in Chinese). *Prog Nat Sci*, 2008, 18: 1001–1008
- 14 Kaufman Y J, Gao B C. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1992, 30: 871–884
- 15 Xia R, Li Y M, Wang Q, et al. Urban expansion in Wuxi city and heat island response by RS analysis(in Chinese). *J Geo-Inf Sci*, 2009, 11: 677–683
- 16 Zha Y, Ni S X, Yang S. An effective approach to automatically extract urban land-use from TM imagery (in Chinese). *J Remote Sens*, 2003, 7: 37–40
- 17 Zhao X F, Ye H. Monitoring the changes of urban heat island seasonal dynamics in the process of urbanization by remote sensing(in Chinese). *Ecol Environ Sci*, 2009, 18: 1817–1821

Application analysis on the urban heat environment monitoring of Chongqing using HJ-1B satellite remotely sensed data

LUO XiaoBo* & LIU MingHao

College of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

*E-mail: luoxb@cqupt.edu.cn

Abstract In this paper, HJ-1B/IRS4 data was used to retrieve land surface temperature (LST) based on mono-window algorithm after the required atmospheric transmittance had been inversed from MODIS data and the required land surface emissivity had been computed through land use classification from HJ-1B/CCD data. Next, the thermal field variation index and the urban heat island of Chongqing were obtained from LST, and the spatial distribution feature of urban heat island was analyzed. Last, the impact of NDVI and NDBI on heat island was analyzed in Chongqing, China. The conclusions are as follows: (1) The urban heat islands are mainly distributed in the regions from southwestern Chongqing to northeastern Chongqing between Zhongliang Mountain and Tongluo Mountain; (2) The centers of urban heat island are not located in the city center, but located in the regions with high energy consumption and high population density, such as Dudukou industrial park and the Jiangbei airport, where the range of heat island intensity is between from 5°C to 10°C; (3) The heat island effect is not clear in densely built area close to the Yangtze River and Jialing River; (4) NDVI and heat island intensity are negatively correlated, NDBI and heat island intensity are obviously positive correlated, both NDVI and NDBI have a significant impact on heat island intensity, and NDBI has a greater impact. So, heat island monitoring based on HJ-1B data can better reveal the spatial distribution of urban heat islands of Chongqing, and provide a reference for urban environment monitoring and bettering.

Keywords HJ-1B, mono-window algorithm, land surface temperature, urban heat island effect