

文章编号: 1007 4619(2006) 05 0789 09

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

张 勇^{1,2,3}, 余 涛^{1,2}, 顾行发^{1,2,4}, 张玉香³, 陈良富^{1,2},
余姗姗^{1,2}, 张文君^{1,2,4}, 李小文^{1,4,5}

(1 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2 国家航天局 航天遥感论证中心, 北京 100101;
3 中国气象局 国家卫星气象中心, 北京 100081; 4 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054
5. 遥感科学国家重点实验室, 北京师范大学, 北京 100875)

摘 要: 针对 CBERS-02 IRMSS 的热红外通道特性, 对 Jimenez Munoz 和 Sobrino 提出的普适性单通道地表温度反演算法进行改进, 并利用该传感器热红外遥感数据反演北京地区和苏锡常地区的地表温度; 利用 2004 年 8 月 17 日在青海湖的野外实测数据对该算法的地表温度反演结果进行的验证表明, 改进的单通道反演算法应用于 CBERS-02 IRMSS 传感器热红外数据的地表温度反演具有很高的反演精度。并在此基础上, 运用城市热场变异指数对北京地区和苏锡常地区的城市热岛效应进行分析, 运用中国研制的热红外卫星遥感数据给出了城市热岛效应的定量化描述。结果表明, CBERS-02 IRMSS 热红外遥感数据完全可以满足定量化应用的要求, 具有很大的应用潜力。

关键词: CBERS-02 IRMSS 热红外遥感数据; 单通道; LST 反演算法; 城市热岛效应

中图分类号: X87 **文献标识码:** A

Land Surface Temperature Retrieval from CBERS-02 IRMSS Thermal Infrared Data and Its Applications in Quantitative Analysis of Urban Heat Island Effect

ZHANG Yong^{1,2,3}, YU Tao^{1,2}, GU Xing fa^{1,2,4}, ZHANG Yu xiang³,
CHEN Liang fu^{1,2}, YU Shan-shan^{1,2}, ZHANG Wen jun^{1,2,4}, LI Xiao wen^{1,4,5}

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China
2. The Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing 100101, China
3. National Satellite Meteorological Center, CMA, Beijing 100081, China
4. School of Automation Engineering, the University of Electronic Science and Technology of China, Sichuan Chengdu 610054, China
5. State Key Laboratory of Remote Sciences, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100875, China)

Abstract Improving the Jimenez Munoz and Sobrino's generalized single channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data (published at Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (doi: 10.1029/2003JD003480)) according to the thermal channel's characteristics of CBERS-02 IRMSS and using its thermal infrared remote sensing data to inverse the land surface temperatures of Beijing and Su-Xi-Chang areas. Field measurement data at Lake Qinghai on August 17, 2004 was selected as the criterions to validate the inverse results of LST and the outcomes indicated that the improved single channel LST inversion algorithm was

收稿日期: 2006-04-10 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

作者简介: 张 勇 (1977—), 男, 博士, 主要从事定量遥感、遥感传感器辐射定标和热红外遥感的理论和应用研究。

very suitable for CBERS-02 IRMSS thermal infrared data and with high accuracy inversion results. Based on the LST retrieved from IRMSS thermal infrared data, a new index called urban thermal field variance index was used to quantitatively analyze the urban heat island effect. The conclusions showed that CBERS-02 IRMSS thermal infrared data can satisfy the requirements of quantitative applications and have a prodigious application potential.

Key words CBERS-02 IRMSS thermal band; in-flight field calibration; onboard blackbody calibration; cross calibration

1 引 言

中巴地球资源一号卫星 02 星 (CBERS-02) 的红外多光谱扫描仪 (IRMSS) 是中国研制的长寿命实时传输型地球资源红外多光谱遥感器, 是该星的重要有效载荷之一, 是获取地球资源信息不可缺少的部分。IRMSS 每隔 26 天重复覆盖一次, 其热红外波段可提供包括对目标热辐射特性、发射率、热惯量、大气传输的衰减和气候条件等多种参数的探测, 具有很大的应用潜力。该波段的波长区间为 10.4—12.5 μm , 星下点空间分辨率为 156m, 地面扫描宽度为 119.5km。这一地面分辨率远比气象卫星 NOAA AVHRR 遥感数据的地面分辨率 (天顶视角下为 1.11km \times 1.11km) 高, 因此, 对于要求精确的区域分析来说, 应用 IRMSS 数据是比较好的选择。该传感器自发射至今已在轨正常运行 2 年时间, 积累了大量数据资料, 为该数据的定量化应用提供了数据保证。

陆地表面温度 (Land Surface Temperature, LST) 在地表与大气相互作用过程中起着重要的作用, 它在气象、地质、水文、生态等众多领域有着广泛的需求。土壤水分状况和森林火灾的检测, 地热位置的判别, 军事伪装的应用, 石油和铀矿的寻找等都离不开地物表面温度信息。从 20 世纪 70 年代末, LST 热红外遥感应用已经广泛地开展^[1-3], 热红外遥感与可见光遥感几乎同时引起中国各应用部门的关注。地表温度的定量遥感研究已被列为中国攀登项目的研究任务。目前对 LST 数据应用最广泛的是 NOAA AVHRR 数据, 而最常用的方法就是分裂窗算法 (Split Windows)。1984 年 Price 利用大气辐射传输理论, 对大气的影 响作简化处理后提出了分裂窗算法, 该算法通过两个通道对大气的不同吸收响应来部分地消除大气的影 响^[6]。还有就是使用单窗算法, 即仅有一个热红外波段数据时, 传统上是通过大气校正法从 Landsat TM 6 数据中反演地表温度。这一方法需要进行大气模拟, 以便从卫星高度所观

测到的热辐射中扣减去大气的辐射分量, 从而得到地面上应有的热红外辐射量, 最后考虑到地表发射率的影响, 再反演出真正的地表温度。这一方法操作较复杂, 实际可行性较差。因此, 针对 LST 的单窗反演算法, 已经有许多学者对 Landsat TM 6 数据发展出许多简便可行的方法。覃志豪等^[7]根据地表热辐射传导在 TM 6 波段区间内的特征, 提出了一个较简易可行的单窗算法, 用来从 TM 6 数据中反演地表温度。这一单窗算法需要 3 个基本参数: 地表发射率、大气透射率和大气平均作用温度。传统的单通道算法的缺点在于需要大气参数, 通常由气象探测测量确定。Jimenez Munoz 和 Sobrino^[8]提出的普适性单通道算法, 也可用来从 TM 6 数据中反演地表温度。该算法适用于不同的卫星传感器, 并且反演所需的参数少, 只需传感器的通道有效波长、大气水汽含量和传感器入瞳处的辐亮度。Jimenez Munoz 和 Sobrino 用不同的传感器进行验证, 对于 AVHRR 通道 4 和 ATSR-2 通道 11 反演获得的 LST 的均方误差低于 2K, 对于 TM 6 低于 1.5K。

本文针对 CBERS-02 IRMSS 热红外通道数据的特点, 对 Jimenez Munoz 和 Sobrino 提出的普适性单通道地表温度反演算法进行了改进, 并反演了北京地区和苏锡常地区的地表温度。在此基础上, 分析该地区的城市热岛效应, 利用中国研制的热红外卫星遥感数据给出热岛效应的定量化描述, 以达到对 IRMSS 热红外数据的定量化应用示范的目的。

2 IRMSS 热红外数据地表温度反演算法

根据辐射传输方程, 在某一给定波长位置的卫星入瞳处的辐亮度可以表达为:

$$L_{\lambda}^{at\ sensor} = [\epsilon_{\lambda} B(\lambda, T_s) + (1 - \epsilon_{\lambda}) L_{\lambda}^{at\ \downarrow}] \tau_{\lambda} + L_{\lambda}^{at\ \uparrow} \quad (1)$$

式中, ϵ_{λ} 是地表发射率, $B(\lambda, T_s)$ 是 T_s 温度下的黑体发射辐射, T_s 就是本文中需要反演的陆地表面温度 (LST), $L_{\lambda}^{at\ \downarrow}$ 是大气的下行辐射, τ_{λ} 是大气的总透过率, $L_{\lambda}^{at\ \uparrow}$ 是大气的上行辐射, 所有这些都与观

测角度有关。 $B(\lambda, T_s)$ 的表达式为:

$$B(\lambda, T_s) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left[\frac{c_2}{\lambda T_s}\right] - 1} \quad (2)$$

式中, $c_1 = 1.9104 \times 10^8 \text{ W} \mu\text{m}^4 \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$, $c_2 = 1.43877 \times 10^4 \mu\text{mK}$, $B(\lambda, T_s)$ 的单位是 $\text{W} \mu\text{m}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 。

根据 Jimenez Munoz 和 Sobrino^[8] 提出的普适性单通道地表温度反演算法, 可以将地表温度计算近似为:

$$T_s = \gamma(\lambda, T_o) \{ \epsilon_\lambda^{-1} [\psi_1(\lambda, w) L_\lambda^{at, sensor} + \psi_2(\lambda, w)] + \psi_3(\lambda, w) \} + \delta(\lambda, T_o) \quad (3)$$

在这个方程中, γ 和 δ 两参数是通过 Plank 方程的线性近似获得的, 大气状态方程 ψ_1 , ψ_2 和 ψ_3 是从大气状态参数中计算得到的, 可以表达为:

$$\gamma(\lambda, T_o) = \frac{1}{\beta(\lambda, T_o)}, \quad \delta(\lambda, T_o) = -\frac{\alpha(\lambda, T_o)}{\beta(\lambda, T_o)} \quad (4)$$

$$\psi_1(\lambda, w) = \frac{1}{\tau(\lambda, w)},$$

$$\psi_2(\lambda, w) = -L^{am, \downarrow}(\lambda, w) - \frac{L^{am, \uparrow}(\lambda, w)}{\tau(\lambda, w)},$$

$$\psi_3(\lambda, w) = L^{am, \downarrow}(\lambda, w) \quad (5)$$

方程中的辐亮度单位是 $\text{W} \mu\text{m}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$, 温度单位是 K, 波长为 μm , 大气水汽含量单位是 g/cm^2 。其中,

$$\alpha(\lambda, T_o) = B(\lambda, T_o) \left[1 - \frac{c_2}{T_o} \left(\frac{\lambda^4}{c_1} B(\lambda, T_o) + \frac{1}{\lambda} \right) \right]$$

$$\beta(\lambda, T_o) = \frac{c_2 B(\lambda, T_o)}{T_o^2} \left[\frac{\lambda^4}{c_1} B(\lambda, T_o) + \frac{1}{\lambda} \right] \quad (6)$$

以上 6 个方程中的波长 λ 均是传感器热红外通道的有效波长, 其计算公式为:

$$\lambda_{eff} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda} \quad (7)$$

式中, λ_{eff} 即为有效波长; $f(\lambda)$ 为传感器热红外通道的光谱响应函数; λ_1, λ_2 为某谱段的起始波长和终止波长。

根据 IRM SS 传感器热红外通道的光谱响应函数, 利用 Jimenez Munoz 和 Sobrino^[8] 给出的与传感器通道响应函数和大气水汽含量相关的大气状态方程的数值表达式, 求得 IRM SS 传感器与大气水汽总含量相关的大气状态方程:

$$\psi_1^{IRMSS9} = 0.01642v^3 - 0.00662v^2 + 0.13314v + 0.99253 \quad (8)$$

$$\psi_2^{IRMSS9} = -0.10563v^3 - 0.33896v^2 - 1.91005v + 0.23545 \quad (9)$$

$$\psi_3^{IRMSS9} = -0.05495v^3 + 0.39116v^2 + 0.98775v - 0.08896 \quad (10)$$

根据以上算法, 利用 CBERS-02 IRM SS 传感器热红外数据反演地表温度, 必须给出以下 5 个参数:

(1) 地表发射率 (ϵ_λ): 获得地表发射率的方法很多^[9-11], 本研究所采用的方法是利用 IRM SS 相机的第 4 波段 (波段范围: 0.50—0.90 μm) 图像进行分类, 将地表根据 Snyder 和 Wan 等^[12] 文章中提供的标准分成若干类, 分别获取每类地物的发射率曲线, 然后根据 IRM SS 传感器热红外通道的光谱响应函数, 计算获得该地物相对于 IRMSS 的热红外通道发射率。

(2) 传感器入瞳处的辐亮度 ($L_\lambda^{at, sensor}$): 根据张勇和顾行发等^[13] 提供的 IRM SS 传感器热红外通道的绝对辐射定标系数, 对 IRM SS 热红外数据进行绝对辐射定标, 获取传感器入瞳处的辐亮度。

(3) 接近于地表温度的初始温度 (T_o): 这个值可以通过多种方法获得^[14], 本文是将卫星入瞳处的亮度温度作为初始温度, 该温度是根据传感器入瞳处的辐亮度 ($L_\lambda^{at, sensor}$) 和该热红外通道的光谱响应函数, 反解 Plank 方程获得的。

(4) 大气的水汽总含量 (w): 获得大气水汽总含量的方法很多^[15-18], 本研究采用 TERRA MODIS 的 MOD05 水汽产品数据, 获取与反演地区时空同步的大气柱水汽总含量。

(5) 传感器热红外通道的有效波长 (λ): 有效波长是根据 CBERS-02 /IRM SS 传感器热红外通道的光谱响应函数, 利用式 (7) 计算获得的。

3 研究样区概况

为了利用 CBERS-02 IRMSS 热红外遥感数据定量化分析中国主要经济区的城市热岛效应, 选择了北京地区 2004 年 9 月 8 日和苏州、无锡地区 2004 年 11 月 20 日的 CBERS-02 IRMSS9 波段数据 (如图 1 和图 2 所示), 进行地表温度反演, 并且利用 2004 年 8 月 17 日青海湖的热红外数据以及当天野外实测数据, 对该单通道地表温度算法进行精度评价。

北京, 中国政治、经济、科技、文化、教育中心。位于华北平原西北边缘, 东南距渤海约 150km。北京市中心位于北纬 39°, 东经 116°。北京平原的海

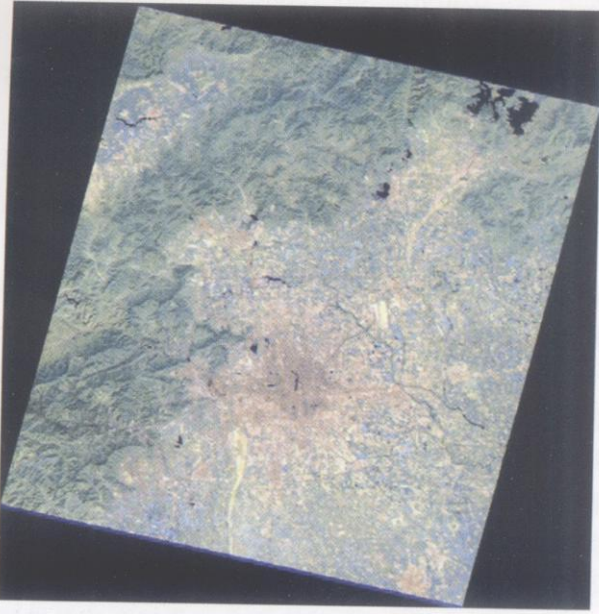


图 1 2004 年 9 月 8 日北京地区 IRMSS 遥感影像
Fig.1 IRMSS data of Beijing on Sept. 8th, 2004

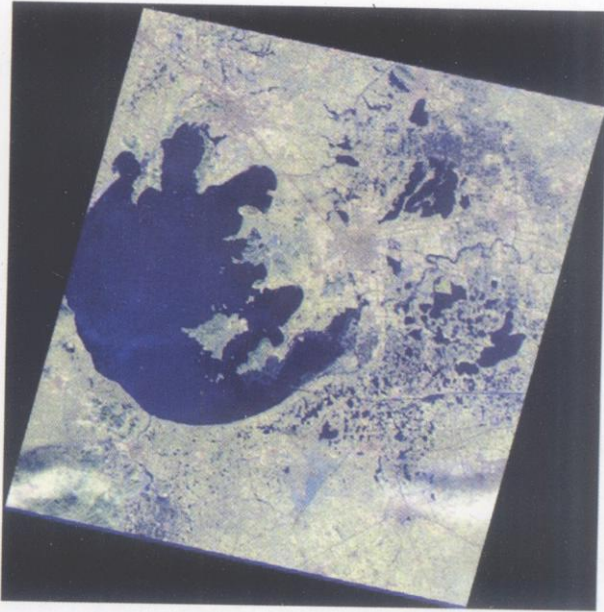


图 2 2004 年 11 月 20 日苏锡常地区 IRMSS 遥感影像
Fig.2 IRMSS data of Su-Xi-Chang area on Nov. 20th, 2004

拔高度在 20—60m, 山地一般海拔 1000—1500m。北京的地势是西北高、东南低。西部是太行山余脉的西山, 北部是燕山山脉的军都山, 两山在南口关沟相交, 形成一个向东南展开的半圆形大山弯, 它所围绕的小平原即为北京小平原。北京全市土地面积 16807.8km², 其中平原面积 6390.3km², 占 38%; 山区面积 10417.5km², 占 62%; 城区面积 97.1km²; 近郊区面积 1282.8km²; 远郊区面积 3198km²。北京的气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候, 夏季

炎热多雨, 冬季寒冷干燥, 春、秋短促。年平均气温 10—12℃, 1月 -7—-4℃, 7月 25—26℃, 极端最低 -27.4℃, 极端最高 42℃以上。全年无霜期 180—200天, 西部山区较短。年平均降雨量 600多 mm, 为华北地区降雨最多的地区之一, 山前迎风坡可达 700mm 以上。降水季节分配很不均匀, 全年降水的 75%集中在夏季, 7、8月常有暴雨。北京是全国交通中心, 公路、铁路、民航网络覆盖全国, 国际运输线路四通八达, 可直达世界各地。截止到 2004 年底, 全市共有户籍人口 1170 万人以上。城区人口密度最高, 为 23008 人 / km², 近郊区为 5669 人 / km², 远郊区 366 人 / km², 人口密度大, 热岛效应明显。

苏锡常地处中国东部沿海开放前沿地带的长江三角洲平原, 东倚上海, 西连南京, 北靠长江, 南邻太湖, 是中国两大国家级生产力布局轴线的交汇处。改革开放以来, 苏锡常成为中国经济增长最迅速、结构变动最明显的地区之一, 它以仅占江苏省 17% 左右的面积和人口, 创造了占全省 40% 的 GDP 和财政收入。苏州、无锡的经济总量在全国的所有城市中分居第 7 和 10 位, 人均指标分列 6 和 7 位, 是全国的经济明星城市。在中国 200 城市综合竞争力 (2002 年) 排名中, 苏州、无锡均位居前列。苏州是中国的历史文化名城和重要的风景旅游城市, 是长江三角洲重要的中心城市之一。位于江苏省东南部, 东临上海, 南接浙江, 西抱太湖, 北依长江。市区中心地理坐标为北纬 31°19′, 东经 120°37′。全市地势低平, 土地面积为 8488.42km², 平原占总面积的 55%, 水网密布, 土地肥沃, 物产丰富。2003 年末总人口数为 590.97 万人。无锡市位于北纬 31°7′—32°2′, 东经 119°33′—120°38′, 长江三角洲江湖间走廊部分。东邻苏州, 南濒太湖, 西接常州, 北临长江。全市总面积为 4787.61km², 其中山区和丘陵面积为 782km², 占总面积的 16.8%, 水面面积为 1502km², 占总面积的 31.4%。无锡市总人口 518 万人, 人口密度 1114 人 / km²。苏锡常地区人口密度, 工业集中, 城市热岛效应明显。

4 地表温度反演结果及精度分析

4.1 LST 反演结果

利用前文所述的 CBERS-02 IRMSS 地表温度反演算法, 对 2004 年 9 月 8 日北京地区和 2004 年 11 月 20 日苏锡常地区的 IRMSS 热红外遥感影像进行地表温度反演, 结果如图 3 和图 4 所示。

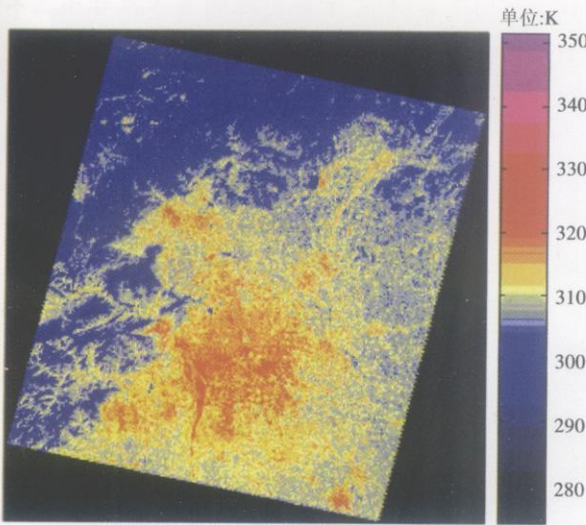


图 3 2004 年 9 月 8 日北京地区 LST 反演结果
Fig.3 Retrieved LST of Beijing area on Sept. 8th, 2004

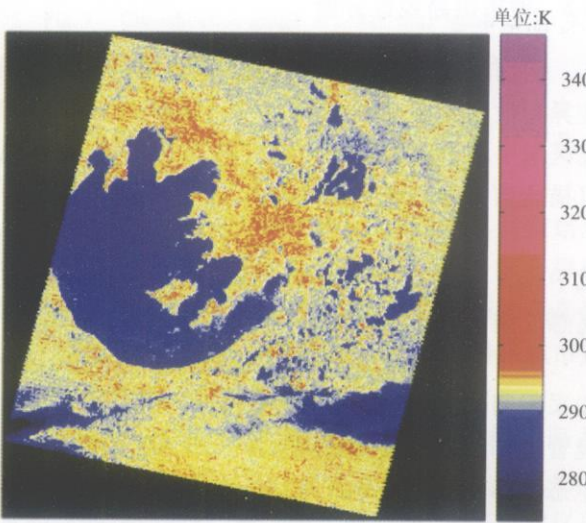


图 4 2004 年 11 月 20 日苏锡常地区 LST 反演结果
Fig.4 Retrieved LST of Su-Xi-Chang area on Nov. 20th, 2004

4.2 反演结果验证

为了对 CBERS-02 IRMSS 热红外通道地表温度反演算法进行精度评价和验证, 选择 2004 年 8 月 17 日青海湖水面作为目标, 反演其水面亮度温度, 并且与当天卫星过顶时刻的水面温度测量数据进行比较。卫星过境当天, 在过境前后半小时, 利用走航式水温仪测量青海湖水面温度, 并在地面同步观测大气状况。2004 年 8 月 17 日卫星过境前后半小时的走航式水温仪的测量数据如图 5 所示, 取平均值 15.97°C 作为该时段青海湖水面温度的测量值。

利用前文所述的针对 IRMSS 的单通道 LST 反

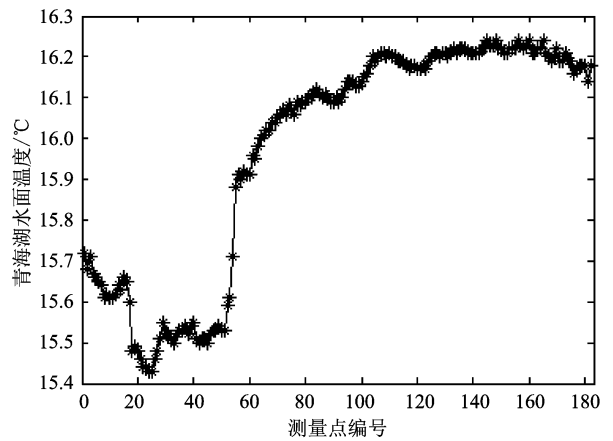


图 5 走航式水温仪青海湖水面温度测量值
Fig 5 Field measuring water temperature data of Lake Qinghai using boating thermometer

演算法, 根据卫星过境当地地面大气水汽状况的同步观测数据, 对 IRMSS 热红外遥感数据进行地表温度反演, 结果如图 6 所示。提取影像上无云区域的青海湖水面温度反演值取平均, 作为与地面测量数据相对应的水面温度遥感反演值, 该平均值为: 289.21K , 即 16.06°C 。遥感反演的水面温度与同步实测水温相差 0.09°C 。

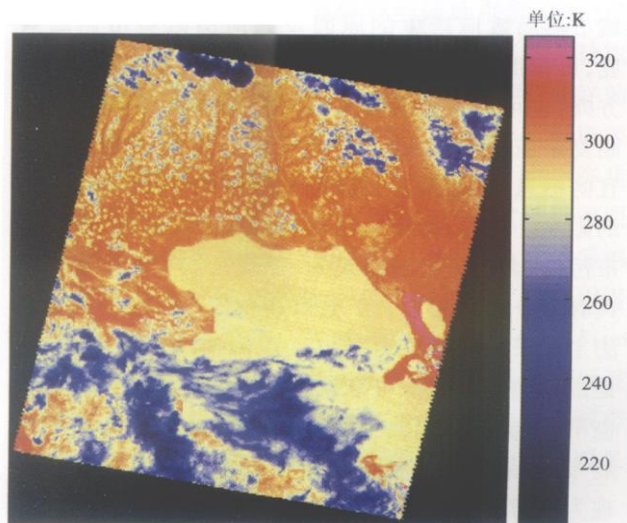


图 6 2004 年 8 月 17 日青海湖地区 LST 反演结果
Fig 6 Retrieved LST of Lake Qinghai area on Aug 17th, 2004

因此, 可以初步认为本文中所描述的针对 CBERS-02 IRMSS 传感器热红外数据的单通道地表温度反演算法具有很高的反演精度。同时, 也说明了, 经过精确辐射定标的 IRMSS 热红外遥感数据具有很好的地表参数反演能力和巨大的应用潜力。

5 城市热岛效应定量分析

5.1 城市热岛效应

城市热力环境是城市生态系统中很重要的一部分,热岛效应的强弱反映了城市气候特征。1918年 Lake Howard 首先发现了英国伦敦的市中心气温比郊区要高,从而引出了“城市热岛”(Urban Heat Island)的概念。所谓城市热岛,即是指城市中城区的气温比周围地区的气温要高,在城市热场分布图上显示出城区好像是一个高温岛屿的现象。它的形成与许多因素有关。城市热岛效应对城市的生态环境十分不利:城市热岛效应会使城市中的相对湿度比郊区小,而暴雨等对流性天气却增多;热岛效应还会使城市的空气质量下降。城市热岛效应的加剧不但影响了局地气候、大气环境^[19, 20],而且对人们的生产和生活质量也造成了严重的影响。随着全球工业化和城市化的飞速发展,热岛效应成为城市发展过程中出现的重要环境问题之一。对城市热岛效应和城市内部热岛强度的充分研究,是人们了解城市复杂系统,掌握城市气候的基本要求。结合城市各功能区的分布特点和气象条件,进一步让人们了解城市热岛效应产生的原因及如何消减城市热岛效应,可帮助人们更好地规划城市的空间形态及发展方向,也可以帮助改善人们的生活环境,从而人工控制复杂城市生态系统,使之得以持续地成为人们适宜的栖息地,并且对全球温室效应的减弱也有积极的影响。同时,对于发现城市人地关系规律、治理城市污染、合理进行城市规划、提高人们生活质量等都具有十分重要的意义。城市热岛效应研究的常规方法主要采用线路观测和定点观测相结合的方法,但是由于线路观测不可能同步进行,观测点位的密度也不可能太高,因此要细致地研究城市热岛的平面展布、内部结构特征则有一定困难^[21],在操作上表现为费时、费力、效率低下、以点线测量代替面不具有代表性等缺点,无法实现温度的宏观动态监测。20世纪60年代遥感技术的出现及不断成熟,给地表温度的大面积、实时、动态监测提供了新的思路,在一定程度上弥补了传统测量方法的不足。随着遥感技术不断地发展,多种航空和卫星手段都能获得动态的城市遥感图像,利用这些遥感图像,在GIS软件和遥感图像处理软件的帮助下,能够很好地分析出城市的空间信息,当然,也包括城市热力环境状况信息,进而调查一个城市的热岛效应程度^[22]。在城

市热岛效应的成因中,下垫面性质改变是其中一个重要因素,因此可以通过遥感反演地表温度反映城市热场分布,间接地反映城市热岛效应实况。近年来,不少学者利用 NOAA 气象卫星和 Landsat TM 热红外资料对城市热岛效应进行研究^[23-39]。可以说,目前研究城市热岛效应的主流方法有两种,一种是利用 NOAA AVHRR 的第 4 通道(10.5—11.3 μm)、第 5 通道(11.5—12.5 μm)来反演地表温度,有时也结合归一化植被指数(NDVI)来分析城市的热岛;另一种方法是利用 Landsat 卫星所携带的 TM 或者 ETM+ 传感器在第 6 波段所获取的热红外图像来反演地表温度,进行相关研究。

本文利用 CBERS 02 IRMSS 传感器热红外遥感数据反演北京地区和苏锡常地区的地表温度,进而对这些区域的城市热岛效应进行量化分析。

5.2 城市热岛效应分析

利用基于遥感反演的地表真实温度的城市热场变异指数来定量分析热岛效应。某点的 LST 与研究区域平均 LST 的差值同研究区域平均 LST 之比,可描述该点的热场变异情况:

$$HI(T) = (T - T_{MEAN}) / T_{MEAN} \quad (11)$$

式中,HI(T)为热市热场变异指数;T为城市某点的遥感反演 LST;T_{MEAN}为城市研究区域的平均 LST。

为了更为直观地描述城市热场变化情况,进一步采用阈值法将热场变异指数分为 6 级,可作为环境管理部门公示城市环境质量的生态指标。该生态指标的阈值划分以及对应的生态意义见表 1。

表 1 生态评价指标的阈值划分

Table 1 Threshold of ecological evaluation index

热场变异指数	热岛效应现象	生态评价指标
≤ 0	无	优
0.000—0.005	弱	良
0.005—0.010	中	一般
0.010—0.015	较强	较差
0.015—0.020	强	差
≥ 0.020	极强	极差

以上文中遥感反演的北京地区和苏锡常地区的 LST 为基础,计算两个地区的城市热场变异指数,并且按照生态评价指标的阈值进行分级,制作出如图 7 和图 8 所示的专题图。

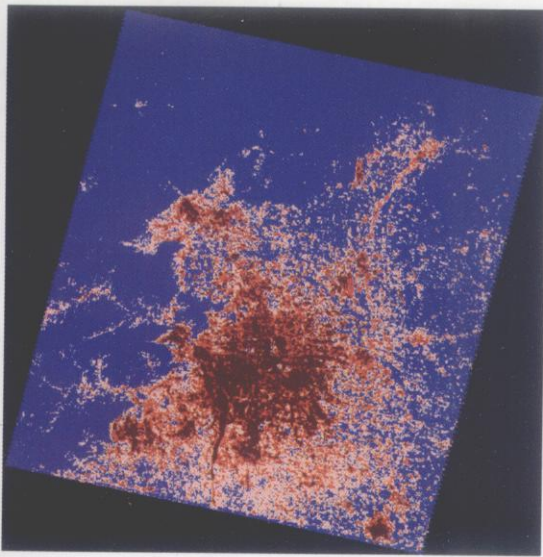


图 7 北京地区夏季城市热岛效应生态评价分级示意图
Fig. 7 Classification graph of urban heat island effect's ecological evaluation in Beijing area's summer

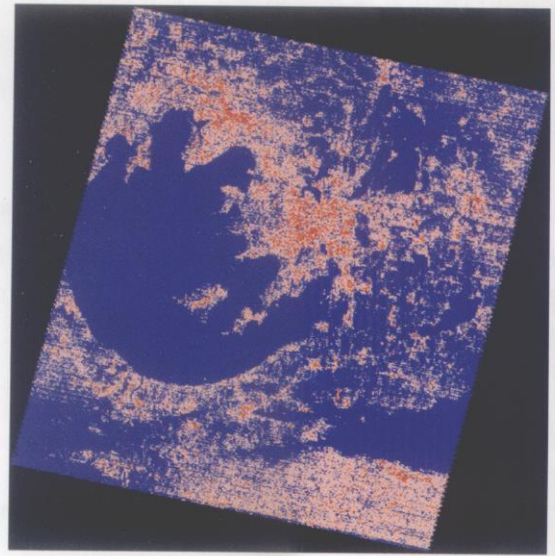


图 8 苏锡常地区冬季城市热岛效应生态评价分级示意图
Fig. 8 Classification graph of urban heat island effect's ecological evaluation in Su-Xi-Chang area's winter

通过对图 7 和图 8 的分析,可以得出以下几个结果:

(1) 利用 CBERS-02 IRM SS 热红外遥感数据反演获得的 LST 进行城市热岛效应分析, 计算获得的城市热场变异指数可以明显的反映出城市的热岛现象。该传感器热红外遥感数据完全可以满足城市热岛效应定量化分析的需要。

(2) 北京是人口超过 1200 万、城市面积 16807.8 km² 的巨型城市, 夏季其主要城区表现出非常明显的热岛效应, 根据图 7 的结果, 主要建城区的热场变异指数均超过了 0.02, 是一种极强的热岛效应。图 8 所示的苏州和无锡, 冬季城区的热场变异指数在 0.015—0.02 表现为强城市热岛效应。通过图 7 与图 8 的比较可以发现, 夏季的城市热岛效应比冬季明显。

(3) 基于遥感反演 LST 的相对温差建立的城市热物变异指数是一个非常敏感的评价因子, 受到诸多因素的影响, 主要包括城市的规模、研究区域的大小、遥感数据的时相和质量等等。基于遥感反演 LST 的相对温差建立的城市热物变异指数需要考虑城市的规模以及空间形态, 研究区域面积选择稍大些, 应能更好地体现城乡热场的差异, 尽量选择夏季的遥感数据进行城市热岛研究。因此, 在这些问题上还需要进行更多考虑, 才能建立一个通用的、定量化的城市热岛强度生态环境指标。

6 结论与讨论

中巴资源卫星是中国研制的地球资源卫星, 已经从 01 星发展到 02 星, 自卫星发射以来, 已有数以万计的卫星图像数据归档, 为其应用奠定了良好的数据基础。作为应用卫星重要组成部分的地球资源卫星, 其目的就是要使其数据能够在国家的经济建设和社会可持续发展中得到应用。本研究结果表明经过精确辐射定标的 CBERS-02 IRM SS 热红外遥感数据具有很好的地表参数反演能力和巨大的应用潜力。中巴资源卫星热红外数据只有 10.4—12.5 μm 的单通道, 因此, 可以利用该数据采用单通道法反演地表温度等地表参数, 以及大气参数反演, 进行城市热岛效应分析和植被遥感定量化应用等, 从而服务于中国的国民经济建设。

CBERS-02 IRM SS 热红外遥感数据对城市热岛现象和城市热环境空间分布的研究具有重要的应用价值。应用热红外数据及光谱数据可以有效地获得城市热环境的空间特征, 进一步对热岛强度进行评价是可行的。基于遥感反演的 LST 相对温差的热场变异指数对热岛评价是一种简便有效的方法, 要使该方法具有更好的通用性, 在具体步骤上还需要更多的研究, 例如热岛强度的生态评价应当结合城市空间形态等。针对中巴地球资源卫星热红外遥感数据

的定量化应用还有待进一步深入, 本文仅应用该数据进行了地表温度反演, 并利用反演结果对城市热岛效应进行了初步的定量化分析, 主要目的是抛砖引玉, 起到对该数据进行定量化应用示范的作用。

致 谢 青海湖野外试验得到了中国资源卫星应用中心、国家卫星气象中心、国家海洋局及青海省气象局的大力协作和支持表示感谢! 对中国资源卫星应用中心提供遥感数据表示感谢!

参 考 文 献 (References)

- [1] Barton I J. Satellite derived Sea Surface Temperatures: A Comparison Between Operational Theoretical and Experimental Algorithms[J]. *J Appl Meteorol* 1992 **31**: 432—442
- [2] Lagouarde J B, Kerr Y H, Bunnet Y. An Experimental Study of Angular Effects on Surface Temperature for Various Plant Canopies and Bare Soils[J]. *Agric Forest Meteorol* 1995 **77**: 167—190.
- [3] Qin Z, Kamieli A. Progress in the Remote Sensing of Land Surface Temperature and Ground Emissivity Using NOAA-AVHRR Data[J]. *Int J Remote Sens* 1999 **20**: 2367—2393.
- [4] Dash R, Gottsche F M, Olesen F S *et al*. Land Surface Temperature and Emissivity Estimation from Passive Sensors Data: Theory and Practice current Trends[J]. *Int J Remote Sens* 2002 **23**: 2563—2594
- [5] Schmugge T, French A, Ritchie J G *et al*. Temperature and Emissivity Separation from Multispectral Thermal Infrared Observations[J]. *Remote Sens Environ* 2002 **79**: 189—198
- [6] Price J C. Land Surface Temperature Measurements from the Split Window Channels of the NOAA-7 AVHRR[J]. *Journal of Geophysical Research* 1984 **89**: 7231—7237.
- [7] Qin Z H, Kamieli A, Berliner P. A Monowindow Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM Data and Its Application to the Israel-Egypt Border Region[J]. *Int J Remote Sens* 2001 **22**: 3719—3746.
- [8] Jimenez Munoz J C, Sobrino J A. A Generalized Single-Channel Method for Retrieving Land Surface Temperature from Remote Sensing Data[J]. *Journal of Geophysical Research* 2003 **108** (doi: 10.1029/2003JD003480).
- [9] Becker F, Li Z. Surface Temperature and Emissivity at Various Scales: Definition, Measurement and Related Problems[J]. *Remote Sens Rev* 1995 **12**: 225—253
- [10] Goita K, Royer A. Surface Temperature and Emissivity Separability over Land Surface from Combined TIR and SWIR AVHRR Data[J]. *IEEE Trans Geosci Remote* 1997 **35**(3): 718—733.
- [11] Sobrino J A, Raissouni N. Toward Remote Sensing Methods for Land Cover Dynamic Monitoring: Application to Morocco[J]. *Int J Remote Sens* 2000 **20**: 254—366
- [12] Snyder W G, Wan Z, Zhang Y *et al*. Classification-based Emissivity for Land Surface Temperature Measurement from Space[J]. *Int J Remote Sensing* 1998 **19**(14): 2753—2774
- [13] Zhang Y, Gu X F, Yu T *et al*. Absolute Radiometric Calibration of CBERS-02 IRMS Thermal Band[J]. *Science in China Series E*, 2005 **35**(Supp 1): 70—88. [张勇, 顾行发, 余涛等. CBERS-02 IRMS 传感器热红外通道综合辐射定标[J]. 中国科学 E 辑, 2005 **35**(增 1): 70—88]
- [14] Gu D, Gillespie A. A New Approach for Temperature and Emissivity Separation[J]. *Int J Remote Sens* 2000 **21**: 2127—2132
- [15] Gao B C, Goetz F H. Column Atmospheric Water Vapor and Vegetation Liquid Water Retrievals from Airborne Imaging Spectrometer Data[J]. *J Geophys Res* 1995 **95**: 3549—3564
- [16] Kaufman Y J, Gao B C. Remote Sensing of Water Vapor in the Near IR from EOS MODIS[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 1992 **30**: 1—27
- [17] Gao B C, Heidebrecht K B, Goetz F H. Derivation of Scaled Surface Reflectance from AVRS Data[J]. *Remote Sens Environ* 1993 **44**: 165—178
- [18] Sobrino J A, Elkharraz J, Li Z. Surface Temperature and Water Vapor Retrieval from MODIS Data[J]. *Int J Remote Sens* 2003 **24**(24): 5161—5182
- [19] Matson M, McClain E B, McGinnis D F *et al*. Satellite Detection of Urban Heat Island[J]. *Monthly Weather Review* 1978 **106**: 1735—1734.
- [20] Price J C. A Assessment of the Urban Heat Island Effect Through the Use of Satellite Data[J]. *Monthly Weather Review* 1979 **107**: 1554—1557
- [21] Zhao J H. Remote Sensing Approach to Urban Thermal Island[J]. *Urban Environment and Urban Ecology* 1994 **7**(4): 40—41. [赵俊华. 城市热岛的遥感研究[J]. 城市环境与城市生态, 1994 **7**(4): 40—41.]
- [22] Su S M, Lu C Y. Study on Monitoring Intensity of Urban Heat Island and Taking it as an Indicator for Urban Ecosystem by Remote Sensing[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2002 **41**(1): 66—70. [孙飒梅, 卢昌义. 遥感监测城市热岛强度及其作为生态监测指标的探讨[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2002 **41**(1): 66—70.]
- [23] Fan X X, Liu J H. Research on the Dynamic Monitoring the Urban Heat Island of the Main Cities in China[M]. Beijing: Beijing University Press, 1991. [范心圻, 刘继韩. 我国主要城市热岛现象动态监测研究[M]. 北京: 北京大学出版社, 1991.]
- [24] Lo C P, Quattrochi D A, Luval J C. Application of High-resolution Thermal Remote Sensing and GIS to Assess the Urban Heat Island Effect[J]. *Int J of Remote Sens* 1997 **18**(2): 287—304
- [25] Gupta R K, Prasad S, Sai M V R S *et al*. The Estimation of Surface Temperature over an Agricultural Area in the State of Haryana and Punjab, India and its Relationship with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Using NOAA-AVHRR Data[J]. *Int J of Remote Sens* 1997 **18**(18):

- 3729—3741.
- [26] Xu H Q, Chen B Q. A Study on Urban Heat Island and its Spatial Relationship with Urban Expansion, Xi'an, SE China [J]. *Urban Studies* 2004 11(2): 65—70 [徐涵秋, 陈本清. 城市热岛与城市空间发展的关系探讨——以厦门市为例 [J]. 城市发展研究, 2004 11(2): 65—70]
- [27] Zhou S Z, Shu J. Urban Climatology [M]. Beijing: Meteorology Press, 1994 [周淑贞, 束炯. 城市气候学 [M]. 北京: 气象出版社, 1994.]
- [28] Shu J, Jiang T H, Yang X M. Temporal Characteristics of Urban Heat Island in Shanghai [J]. *Shanghai Environmental Science* 2000 19(11): 532—534. [束炯, 江田汉, 杨晓明. 上海城市热岛效应的特征分析 [J]. 上海环境科学, 2000 19(11): 532—534.]
- [29] Li Y M, Zhang J H, Gu R Z. Research on the Relationship between Urban Greening and the Effect of Urban Heat Island [J]. *China Gardens* 2004 (1): 72—75 [李延明, 张济和, 古润泽. 北京城市绿化与热岛效应的关系研究 [J]. 中国园林, 2004 (1): 72—75]
- [30] Song Y L, Zhang S Y. The Study on Heat Island Effect in Beijing During Last 40 Years [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* 2003 11(4): 126—129 [宋艳玲, 张尚印. 北京市近 40 年城市热岛效应研究 [J]. 中国生态农业学报, 2003 11(4): 126—129.]
- [31] Zhao H X. A Research on Monitoring Kunming City Heat Island Using NOAA AVHRR [J]. *Remote Sensing for Land and Resources* 1999 (4): 29—32 [赵红旭. 昆明市热岛效应卫星监测研究 [J]. 国土资源遥感, 1999 (4): 29—32]
- [32] Yang D B, Wang S G, Wang Y X. Analyses of Climatic Variation and Heat Island Effect in Lanzhou [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 1994 30(4): 161—167. [杨德保, 王式功, 王玉玺. 兰州城市气候变化及热岛效应分析 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 1994 30(4): 161—167]
- [33] Yan H, Deng L T. Character Analysis of Heat Island in Shanghai City Using Remote Sensing Parameters [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004 20(5): 579—585. [延昊, 邓莲堂. 利用遥感地表参数分析上海市的热岛效应及治理对策 [J]. 热带气象学报, 2004 20(5): 579—585]
- [34] Zhang S H, B Y, Du Y. Investigation on Heat Island Effecting in Wuhan City Zone by Remote Sensing [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* 2003 12(5): 445—449 [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]
- [35] Chen Y H, Wang J, Li X B. A Study on Urban Thermal Field in Summer Based on Satellite Remote Sensing [J]. *Remote Sensing for Land and Resources* 2002 (4): 55—59 [陈云浩, 王洁, 李晓兵. 夏季城市热场的卫星遥感分析 [J]. 国土资源遥感, 2002 (4): 55—59]
- [36] Lin X G, Yu S Q, Tang G L. Research on the Relationship between Urbanization and Urban Heat Island in Beijing City [J]. *Progress of Natural Sciences* 2005 15(7): 882—886 [林学椿, 于淑秋, 唐国利. 北京城市化进程与热岛强度关系的研究 [J]. 自然科学进展, 2005 15(7): 882—886]