

城市街区尺度地表热环境遥感监测与分析

石满¹, 陈健¹, 吴迪¹, 覃帮勇², 李盛阳²

(1. 南京信息工程大学 遥感与测绘工程学院, 江苏 南京 210044;

2. 中国科学院太空应用重点实验室, 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094)

摘要: 近年来对城市热环境的研究大多集中在大尺度或城市区域尺度上, 基于街区尺度的热环境研究较少。本研究基于高空间分辨率的天官一号热红外数据, 利用 JM&S (Jiménez-Muñoz & Sobrino) 算法反演了南京部分地区地表温度, 进而揭示了南京地区夜间地表热环境空间分布规律并分析了其与地表覆盖类型的关系, 探讨了不同街区夜间地表温度的差异。研究结果表明, 天官一号具有热异常检测能力, 能较好地体现街区尺度地表温度的空间异质性; 南京夜间存在明显的城市热岛效应, 热岛强度为 2.6 K, 局部热岛效应较为突出; 受土地覆盖类型、人口、建筑等因素的影响, 不同街区地表温度差异较为明显。

关键词: 天官一号; 地表温度; 街区尺度; 高空间分辨率

中图分类号: TP951 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8891(2019)01-0084-08

Remote Sensing Monitoring and Analysis of Surface Thermal Environment at City District Scale

SHI Man¹, CHEN Jian¹, WU Di¹, QIN Bangyong², LI Shengyang²

(1. School of Remote Sensing and Surveying and Mapping Engineering, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Space Utilization, Technology and Engineering Center for space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Research on urban thermal environments is mostly focused on large or urban area scales; research on district-scale urban environments is inadequate. In this study, the high-spatial-resolution thermal infrared domain data from the Tiangong-1 satellite was used to retrieve the land surface temperature (LST) of areas in Nanjing based on the JM&S method. The spatial distribution of the land surface thermal environment in Nanjing at night was revealed, and its relationship with the surface cover was analyzed. The difference in LST in different districts at night was observed. Our results show that the high-spatial resolution of Tiangong-1 has thermal anomaly detection abilities, and the heterogeneity of LST is better reflected through it. An obvious urban heat-island effect exists in Nanjing at night with a 2.6 K heat-island intensity. The difference in temperature in different districts is more obvious, which was affected by surface cover, population, and buildings.

Key words: Tiangong-1, land surface temperature, district scale, high spatial resolution

0 引言

地表温度 (Land Surface Temperature, LST) 是常见的地表物理参数之一, 是影响地表物理过程的重要因素, 它在城市热环境、地表辐射能量平衡、全球气候变化等应用领域都有重要研究价值^[1]。自从 Lake Howard 提出“城市热岛”概念以来, 城市空气温度

和城市地表温度一直是城市热环境研究的重点^[2]。相比传统的监测手段, 遥感技术具有快捷、时间同步性、连续性、高覆盖范围等特点, 可以获取大范围的地表温度, 已逐渐成为城市热环境研究的重要手段^[3]。

随着城市气候和环境问题日益突出, 国内外学者利用遥感数据在城市地表热环境研究方面做了大量工作。不同空间尺度的热红外遥感数据被用来进行地

收稿日期: 2018-04-11; 修订日期: 2018-11-09.

作者简介: 石满 (1994-), 女, 江苏盐城, 硕士, 主要从事定量遥感研究。E-mail: shiman_nuist@163.com.

通信作者: 陈健 (1978-), 男, 山东淄博, 博士, 副教授, 主要从事定量遥感研究。E-mail: chjnju@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金“城市街道峡谷气温时空分布与变化机制模拟研究”(41571418); 中国科学院太空应用重点实验室开放基金“长时间序列地表热环境监测与变化分析”(LSU-2016-06-02)。

表温度反演和城市热环境的空间分布特征分析。通过MODIS、AVHRR等数据在大尺度城市热环境的研究,发现城市地表温度的分布格局主要受土地覆盖类型的影响,呈现市中心温度高,离市中心越远温度越低的整体分布趋势,城市地表热环境空间分布明显^[4-6];在城市尺度地表热环境的研究中,多使用Landsat TM/ETM+、ASTER等数据,得到了地表温度和植被指数呈负相关,某些区域受人口、建筑和工业活动的影响,温度呈现出高温区和中温区差异的规律^[7-8]。综上所述,在城市地表温度和城市热环境的研究中,多数研究所使用的遥感数据空间分辨率约为百米级,目前分辨率最高的为60m的Landsat 7 ETM+数据,只能研究较为宏观的区域尺度上的城市地表热环境问题。由于城市地表类型的复杂性和特殊性,只有更高空间分辨率的热红外数据才能更加详细地研究城市地表温度内部的结构和局部的变化^[9]。

天宫一号是中国第一个空间目标飞行器和空间试验站,其上搭载的高光谱成像仪是目前中国空间分辨率和光谱分辨率综合指标最高的空间光谱成像仪,其热红外波段数据的空间分辨率高达10m,为研究城市街区尺度城市热环境提供了宝贵的数据源^[10]。本文以南京地区为研究区,选取一景天宫一号高光谱成像仪数据,利用普适性单通道算法反演得到地表温度。在此基础上,进行了南京市热岛强度和街区尺度的热环境空间分布分析。本次研究探讨了天宫一号高光谱热红外波段数据用于城市热环境的应用潜力,并为揭示夜间城市热岛强度和街区尺度地表温度的空间分布规律提供了重要的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文研究区为南京部分城区和郊区,位于31°50'~32°19'N, 118°25'~119°10'E之间,主要包括南京江北新区、建邺区、鼓楼区、下关区、栖霞区等几个市辖区(图1)。气候为亚热带季风气候。区内包括森林、水体、农田、建筑物、道路等多种地表覆盖类型。森林覆盖区域主要为老山、幕府山等山地,以阔叶林为主,在海拔较高的地方有部分针阔混交林。水体覆盖区域主要为长江南京段、滁河、秦淮河、玄武湖、佛手湖等。农田主要位于八卦洲、西南边江浦一带。长江以南基本为城镇和道路。

1.2 数据概况及预处理

本文用于反演地表温度的数据为天宫一号高光谱成像仪红外波段热红外数据,成像时间为2014年3月11日4时(北京时间),空间分辨率为10m,光

谱范围为8~10.5 μm。根据黄小仙等^[11]提供的定标系数对热红外数据进行辐射定标,将DN(Digital Number)值转化为热红外波段辐射亮度。

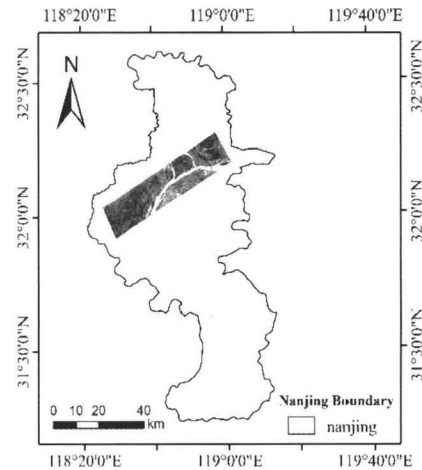


图1 研究区位置及热红外影像图

Fig.1 The location of study area and the thermal infrared image

为了确定不同地物的发射率,本文还使用了高分一号(GF-1)WFV2(Wide Field of View)多光谱相机可见近红外数据。在辐射定标的基础上,以天宫一号数据为基准,对高分一号可见近红外数据进行了几何精校正^[12],并利用FLAASH(Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)模型对高分一号数据进行了大气校正。在此基础上,进行了地表覆盖类型的分类和植被指数的计算,从而确定不同覆盖类型的发射率。研究区的水汽含量值则通过MOD05/07水汽产品数据和NCEP再分析数据^[13]获得。

1.3 地表温度反演算法

由于天宫一号高光谱成像仪红外波段热红外通道只有一个有效波段,因此只能通过单通道算法进行地表温度反演。相对于其他单通道算法,Jiménez-Muñoz & Sobrino单通道算法(以下简称JM&S算法)^[14]不需要卫星过境的实测大气廓线数据和大气平均作用温度,且可适用于不同的遥感数据源,因此本研究选取该方法进行研究区地表温度的反演。

1.3.1 JM&S算法

JM&S算法是由Jiménez-Muñoz和Sobrino于2003年提出的一种普适性反演地表温度的单通道算法,算法表达式为:

$$T_s = \gamma \left[\frac{1}{\varepsilon} (\varphi_1 L_\lambda^{\text{at-sensor}} + \varphi_2) + \varphi_3 \right] + \delta \quad (1)$$

$$\gamma = \left[\frac{c_2 L_\lambda^{\text{at-sensor}}}{T_b^2} \left(\frac{\lambda^4}{c_1} L_\lambda^{\text{at-sensor}} + \lambda^{-1} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

$$\delta = -\gamma L_{\lambda}^{\text{at-sensor}} + T_b \quad (3)$$

式中: T_s 为地表温度; T_b 为亮度温度; λ 为有效波长, 通过积分方式获得; ϵ 表示地表发射率; $L_{\lambda}^{\text{at-sensor}}$ 是星上辐射亮度值; c_1, c_2 为普朗克方程光谱常量, $c_1=1.191 \times 10^8 \text{ W}\cdot\mu\text{m}^4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$, $c_2=1.4387 \times 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{K}$; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 分别为大气函数, 其值与大气水汽含量 ω 有关。

1.3.2 地表发射率的估计

本文使用植被指数和分类相结合的方法来确定地表发射率。首先将研究区中的水体提取出来, 直接赋值为 0.9876^[9]。然后利用公式(4)计算归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI):

$$\text{NDVI} = \frac{b_4 - b_3}{b_4 + b_3} \quad (4)$$

式中: b_4 代表近红外波段的反射率值; b_3 代表红光波段的反射率值。通过各像元的 NDVI 值求出它们的植被覆盖度(5), 最终确定各混合像元的地表发射率:

$$P_v = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_0}{\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_0} \quad (5)$$

式中: $\text{NDVI}_0, \text{NDVI}_v$ 分别代表没有植被覆盖的像元和全植被覆盖像元的 NDVI 值。大多数情况下全植被的地方 NDVI 值在 0.7 以上, 裸土的 NDVI 取值在 0.03~0.06 之间^[15]。经过对研究区数据分析, 本文取 $\text{NDVI}_0=0.05, \text{NDVI}_v=0.7$ 进行植被覆盖度的计算。通过公式(6)计算混合像元的发射率:

$$\epsilon = P_v R_v \epsilon_v + (1 - P_v) R_s \epsilon_s + d_{\epsilon} \quad (6)$$

式中: R_v 和 R_s 分别是植被和裸土的温度比率; ϵ_v 和 ϵ_s 分别是植被和裸土的发射率, 平坦情况下地表发射率修正项 $d_{\epsilon}=0$ 。温度比率^[14]按覃志豪等提出的公式:

$$R_v = 0.9332 + 0.0585P_v \quad (7)$$

$$R_s = 0.9902 + 0.1068P_v \quad (8)$$

通过上述公式得到研究区地表发射率, 见图 2。

1.3.3 大气参数的估计

JM&S 算法中有大气透过率、大气上行辐射和大气下行辐射 3 个大气参数, 可以通过建立大气参数和大气水汽含量之间的关系来计算得出。因为 JM&S 算法中提出来的大气参数主要针对的是 Landsat TM 数据, 本文研究了历华等^[9]人利用 MODTRAN4 和 TIGR3 模拟大气参数和大气水汽含量之间的关系, 通过天宫一号高光谱成像仪的通道响应函数得到大气参数和大气水汽含量之间的二维散点图, 建立回归方

程:

$$\tau_i = 0.6682 - 0.0879\omega - 0.00395\omega^2, R^2 = 0.969 \quad (9)$$

$$L_i^{\uparrow} = 0.4369 + 0.7945\omega - 0.03022\omega^2, R^2 = 0.954 \quad (10)$$

$$L_i^{\downarrow} = 0.5995 + 1.5009\omega - 0.07478\omega^2, R^2 = 0.948 \quad (11)$$

$$\varphi_1 = \frac{1}{\tau_i}; \varphi_2 = -L_i^{\downarrow} - \frac{L_i^{\uparrow}}{\tau_i}; \varphi_3 = L_i^{\downarrow} \quad (12)$$

式中: ω 为大气水汽含量; τ_i 为大气透过率; L_i^{\uparrow} 为大气向上辐射; L_i^{\downarrow} 为大气向下辐射; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 是 JM&S 算法中的大气参数。

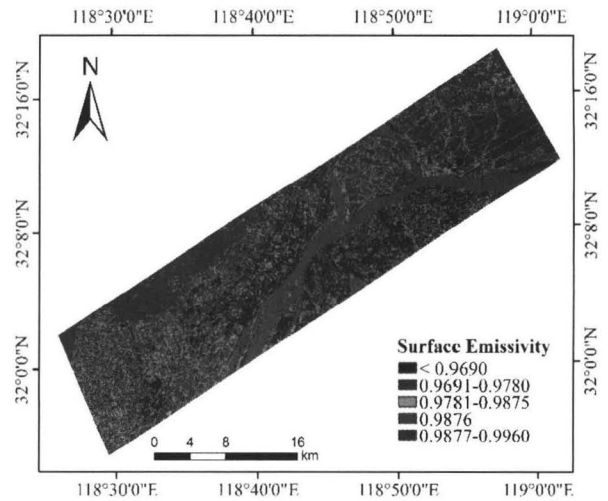


图 2 研究区地表发射率

Fig.2 Surface emissivity map in the study area

2 结果与讨论

2.1 LST 反演结果

利用上述算法得到研究区的地表温度结果见图 3, 通过监督分类对研究区进行土地覆盖类型分类, 结果见图 4。

对比图 3 和图 4 可以看出, 长江等水体温度最高 (除了个别厂区), 这主要是因为成像是夜间, 水的比热容较大, 降温比较缓慢; 下关区、鼓楼区和玄武区这些南京老城区和沿江新开发区的温度较高; 相对于老城区, 受生态环境的控制和调节作用, 栖霞区的地表温度较低, 如燕子矶周边的长江观音景区、北侧区域的二桥公园、乌龙山公园和王家滩等较大型的植被区域; 研究区西南侧区域的植被和东北侧区域的农田温度偏低, 是很明显的低温区域。

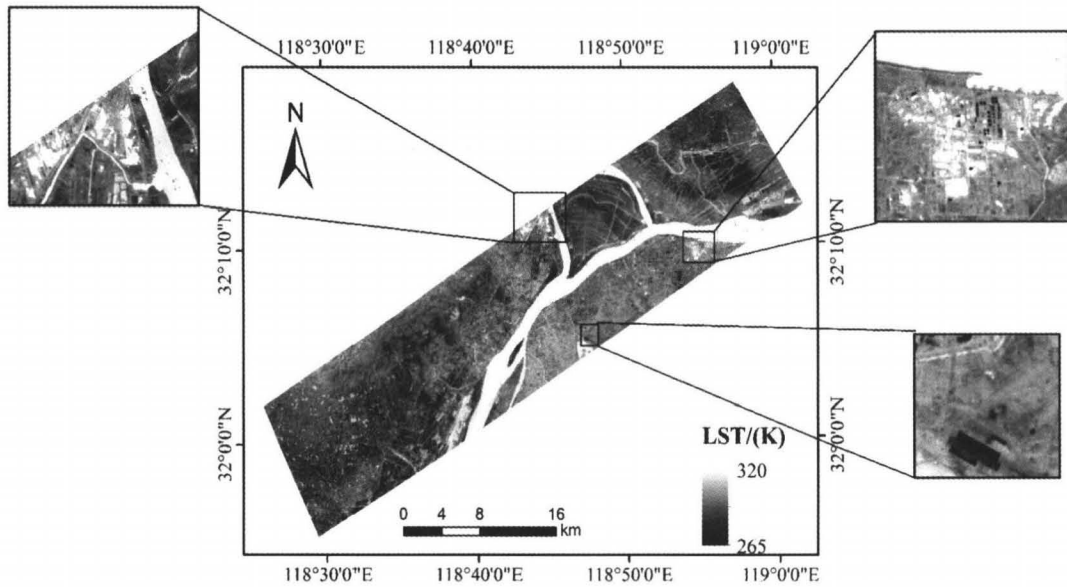


图3 研究区地表温度图

Fig.3 Land surface temperature in the study area

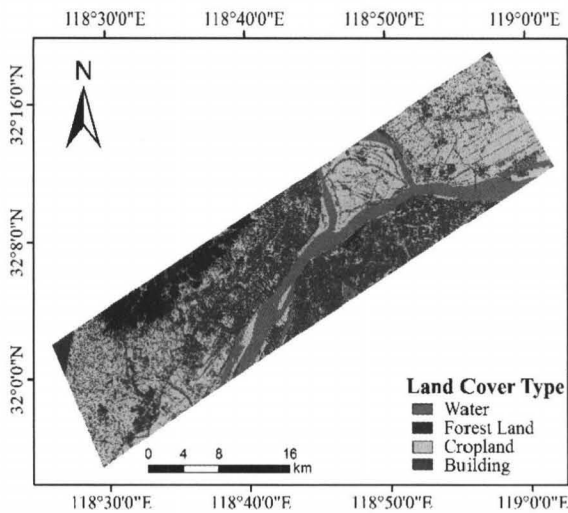


图4 研究区土地覆盖类型图

Fig.4 Land cover type of the study area

通过进一步详细查看典型区域可以看到,南京钢铁集团(图3左上,以下简称南钢)、南京炼油厂(图3右上,以下简称南炼)等区域出现温度异常高值,温度高达320 K,高于水体,这主要可能是因为两个工厂区域夜间仍在生产的原因。而典型低值区则主要出现在一些具有易散热屋顶的建筑材料,如南京火车站(图3右下)等。

本研究缺乏足够的实测数据来进行更加准确的精度验证,但从图中可以定性的看出,本研究的反演结果与地物类型在夜间的分布规律是一致的。历华等^[9]通过MODTRAN4模拟数据发现大气水汽含量误差引起的地表温度误差较小,地表反射率所带来的误差也很接近;于文凭等^[16]发现天宫一号反演的地表温度和地面实测温度有较好的吻合。除此之外, JM&S 算法是比较成熟的算法,已在 Landsat TM/ETM+、

AVHRR 等数据中得到了验证,被很多学者用于地表温度反演,精度一般在0~3 K之间^[17-20]。因此反演结果用于以下的分析是可靠的。

2.2 城市夜间热环境的分布格局及与地表覆盖类型的关系

对整幅图像进行监督分类,将图像分为水体、林地、农田和建筑用地,对每类地物的最小值、最大值、平均值和标准差进行数据统计(表1),可以看出南京3月夜间水体的平均温度远高于其他3类地物的平均温度。林地、农田、建筑用地这三类地物夜间的平均温度相差不大,温度最高的是建筑用地,其次是林地,最低的是农田,它们的温差大约在1~2 K之间。从表中的标准差可以看出,各类地物夜间地表温度的离散程度不一样,建筑用地离散度最高,主要是由于建筑用地土地利用类型差异大的原因,例如裸土、钢制建筑和集装箱在夜间呈现低温,而受人口聚集和工业活动的影响,一些地方呈现高温,很好地体现了温度的异质性;林地由于其稳定性,整体温度差异最小。

表1 研究区不同类型的地表温度

Table1 Land surface temperatures of different surface types in the study area

	Min	Max	Mean	Stddev
Water	277.6	291.3	288.5	2.21
Forest Land	277.2	288.8	283.1	1.48
Cropland	275.4	291.5	282.4	2.04
Building	265.0	320.0	285.7	2.23

为了更好地进行城市夜间地表热环境分析,将水体单独提取出来进行掩膜,得到去除水体后的地表温

度结果,利用密度分割技术将研究区划分成5个温度等级,依次定义为低温区、次低温区、中温区、次高温区和高温区,并统计各个温度区间的面积百分比(表2)。

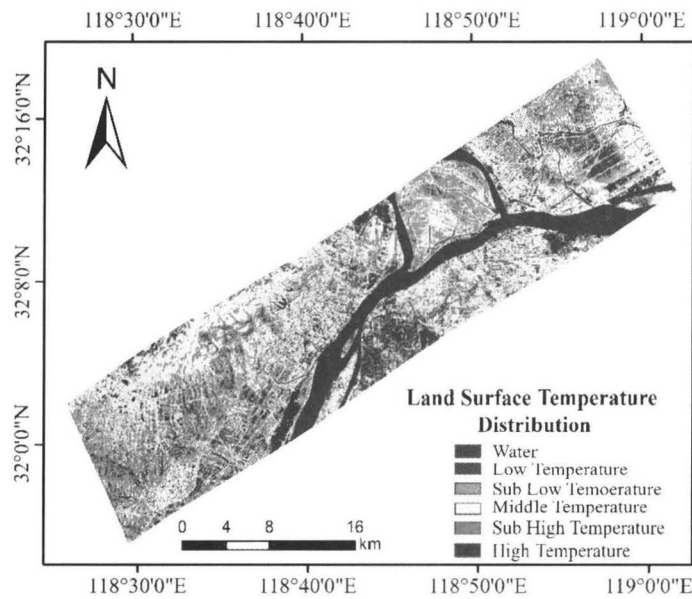
表2 不同地表温度区间划分标准及面积百分比

Table 2 Division criteria and area percentage of different land surface temperatures

Zone	Temperature Range	Aera Percentage/%
Low Temperature	$T_{ni} < T_{mean} - 1.5T_{std}$	5.9
Sub Low Temperature	$T_{mean} - 1.5T_{std} < T_{ni} < T_{mean} - 0.5T_{std}$	25.0
Middel Temperature	$T_{mean} - 0.5T_{std} < T_{ni} < T_{mean} + 0.5T_{std}$	49.6
Sub High Temperature	$T_{mean} + 0.5T_{std} < T_{ni} < T_{mean} + 1.5T_{std}$	10.3
High Temperature	$T_{ni} > T_{mean} + 1.5T_{std}$	9.2

从温度等级分布图(图5)可以看出,研究区内存在4处较为明显的集中性高温区,形成了城市热岛

效应,但导致热岛效应的原因有所不同。南京市中心的下关区、鼓楼区和玄武区北部的城市热岛效应主要是由城市建筑和人为热所造成;长江以北的新开发区、沿江街道和泰山街道处的城市热岛效应主要是因为高密度的居住人口和新开发的建筑;沿江街道与卸甲甸街道的交汇处的南钢、栖霞区北部的南炼由于工业布局影响形成了两处局部热岛;栖霞区南京炼油厂内部的热岛区域出现了一些规则的低温斑块,主要是建筑材质的原因。为了定量的分析城市热岛效应,借鉴王天星等^[21]的计算城市热岛强度的方法,将温度区间划分标准(表2)中的高温区和次高温区作为热岛区,其他3个区作为低温区,热岛区的平均温度与低温区的平均温度的差值作为城市热岛强度,得到研究区城市热岛强度为2.6K。从表1和图5中可以看出,虽然夜间的整体温度差异较小,但城市热岛效应并不弱,主要是由于夜间城市建筑和街道虽然散热快,但由于白天吸热多,仍保存较多的余热。王舒默^[22]在北京昼夜热岛效应的对比中发现,夜间热岛效应表现突出,除北京市区外,其他各区县中心也形成零星热岛,与本研究的结果相似。



(a) Land surface temperature distribution



(b) Central Nanjing



(c) North Bridge Development Aera



(d) Steel Works of Nanjing



(e) Oil Refinery of Nanjing

图5 地表温度等级分布和局部热岛分布图

Fig.5 Land surface temperature distribution and local heat island distribution

2.3 不同街区热环境空间分布规律

在研究区内选取了6个子区域,如图6所示,图像中亮色斑块代表高温,暗色斑块代表低温,从图6(a)~(f)中可以看出天宫一号热红外数据能够更好地呈现地表温度的异质性及街区尺度的分布状况。图6(a)、(b)可以直观地看出老城区的温度高于新城区的温度,以及各小区的空间分布状况;图6(c)中的温度分布不稳定,出现一些较为规则的低温斑块,主要原因是土地利用类型的不同造成的;图6(d)、(e)是大学和商业区夜间温度分布;图6(f)中道路网清晰可见,夜间道路散热快,但仍比周边的温度高。

为了定量分析不同街区热环境的分布特征,本次

研究选取了长江以南和长江以北区域部分建筑用地内的住宅区(老城区和新城区)、商业区、学校和工业园,进行统计分析,如表3,发现夜间城区的平均温度高于工业园和大学,城区主要包括居民区和商业区,楼房密集、绿化面积较少是产生较高温的原因而大学中较密集的植被,工业园中的裸地、稀疏的建筑是产生较低温的主要原因;工业园的平均温度和大学的平均温度差异不大,但是工业园的最低温度低于大学的最低温度,工业园的最高温度高于大学的最高温度,造成这种分布的主要原因是工业区内的钢制建筑和集装箱导致了极低温,而一些化工厂夜间的运作等则导致了极高温的产生。

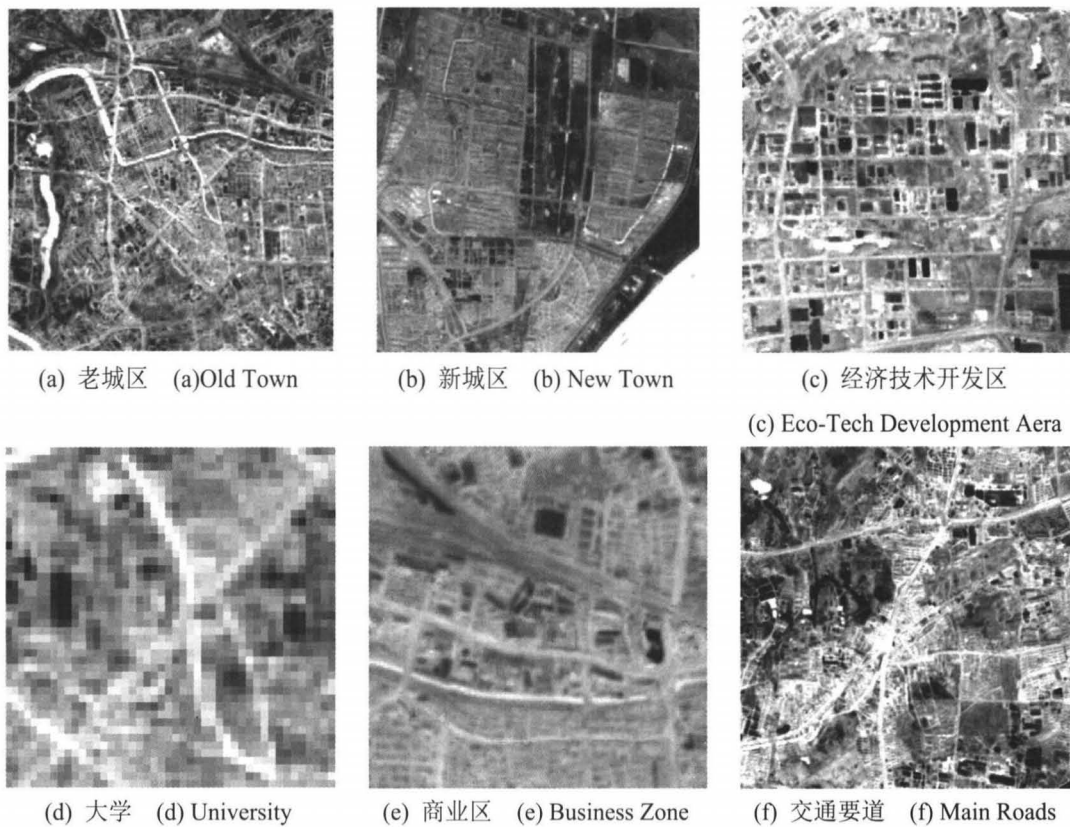


图6 研究区典型区域地表温度分布 Fig.6 Surface temperature distribution in typical areas of the study area

表3 城市内部不同土地利用类型地物温度

Table 3 Surface temperatures of different land usagetypes in the city

	K			
	Min	Max	Mean	Stddev
Old Town	282.2	289.1	286.3	0.75
Eco-Tech	279.2	289.1	285.1	1.08
Business Zone	272.2	289.7	285.7	1.41
University	276.4	288.8	284.3	1.79
Industry	268.8	297.2	284.7	2.19

通过江南、江北住宅区的对比,发现老城区的夜间地表温度高于新开发区,这是因为老城区楼房较为密集且新开发区中植被覆盖较多,在一定程度上降低了地表温度,覆盖度越大,程度越明显。

对新开发区内几个居民区进行统计分析(表4),明发滨江新城(MF urban)、威尼斯水城(Venice)、天润城(TR city)、桥北新村(BN village)之间相互靠近的几个小区温度也有较大的差别,明发滨江新城与周围几个居民区相比,地表温度最高,比临近的桥北新村地表温度高1 K,比天润城和威尼斯水城的地表温度高2 K,不同程度和类型的住宅区与植被

覆盖的混杂分布造成了相邻居民区地表温度的差异。

表4 新开发区内4个居民区的地表温度

Table 4 Land surface temperature in four residential areas of the New Development Zone

	K			
	Min	Max	Mean	Stddev
MF urban	283.2	288.9	286.4	0.75
Venice	280.5	289.1	284.9	0.85
TR city	279.2	288.2	284.7	0.92
BN village	281.6	287.8	285.8	0.79

3 结论与展望

论文利用高空间分辨率的天宫一号热红外遥感影像,使用JM&S算法,反演了2014年3月11日4时的南京部分地区的地表温度并进行了检验。在此基础上,结合高分一号卫星数据获取的地表覆盖类型结果,进行了城市夜间热环境空间分布规律研究。主要结论如下:

1) 通过高空间分辨率的地表温度反演结果,发现天宫一号具有有效检测热异常的能力,能较好地体现地表温度的空间异质性。本研究中,南钢集团、南京炼油厂等厂区在夜间部分地区温度偏高,很可能是夜间仍然在生产作业导致的异常高温。部分建筑物,如南京站等,由于屋顶材料散热性能良好,在夜间呈现较低的温度。这是传统的低空间分辨率热红外数据很难做到的。

2) 若不考虑水体,南京地区夜间仍然呈现明显的热岛现象,热岛强度为2.6 K。南京老城区和新城区的热岛效应是由高密度的人口和建筑交通导致,南炼和南钢由于夜间生产作业导致地表温度高于周边环境。

3) 通过对居民区、大学、工业园区和商业区的比较发现,居民区的地表温度要高于大学和大多数工业园区,老城区的地表温度普遍高于新城区,新城区内靠近的几个小区有明显的温度差异,土地覆盖类型是导致温度差异的主要原因。

本研究仍然存在一些不足,由于可用的天宫一号热红外数据有限,且覆盖范围较小,缺少验证数据,因此只能定性的对反演结果进行检验。在确定地表覆盖类型的时候,由于不同影像成像时间的差异,因此会存在少量斑块覆盖类型不一致的情况,导致个别小斑块的地表温度反演存在误差。尽管如此,通过本研究仍然可以看到,高空间分辨率热红外数据可以提供更加详细的地表温度分布细节,因此,我国仍有必要发展一些新的高空间分辨率的热红外遥感传感器,以

获取更多的数据用于城市热环境、城市气候等方面的研究。下一步,也可针对不同空间分辨率开展地表温度的尺度研究,分析不同尺度上热岛效应的形成机制和它对城市热环境的影响,为城市热环境的缓解和城市土地利用规划提供参考意见。

参考文献:

[1] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 370-384.

[2] 张微. 基于MODIS数据的成都市热岛效应时空变化特征研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2016.

ZHANG Wei. Temporal and spatial variation of heat island effect in Chendu based on MODIS data[D]. Chendu: Sichuan normal school, 2016.

[3] 李璇琼, 李永树, 卢正, 等. 兰州市热岛效应时空演化研究[J]. *城市发展研究*, 2015, 22(7): 18-22.

LI Xuanqiong, LI Yongshu, LU Zheng, et al. Study on Temporal and Spatial Variation of Urban Heat Island of Lanzhou[J]. *Urban Development Studies*, 2015, 22(7): 18-22.

[4] 薛丹, 李成范, 雷鸣, 等. 基于MODIS数据的上海市热岛效应的遥感研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2013, 36(4): 1-3.

XUE Dan, LI Chengfan, LEI Ming, et al. A Study on Urban Heat Island Effect of Shanghai from MODIS Data[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2013, 36(4): 1-3.

[5] 刘勇洪, 轩春怡, 权维俊. 基于卫星资料的北京陆表水体的热环境效应分析[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(1): 73-81.

LIU Yonghao, XUAN Chunyi, QUAN Weijun. Thermal environment effect of land surface water bodies in Beijing based on satellite data[J]. *Lake Sciences*, 2013, 25(1): 73-81.

[6] 曹畅, 李旭辉, 张弥, 等. 中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析[J]. *环境科学*, 2017, 38(10): 3987-3997.

CAO Chang, LI Xuhui, ZHANG Mi, et al. Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China[J]. *Environment Science*, 2017, 38(10): 3987-3997.

[7] 沈德才, 杨燕琼, 吴振彪, 等. 基于Landsat 8的东莞市热岛效应研究[J]. *广东林业科技*, 2014, 30(6): 20-24.

SHEN Decai, YANG Yanqiong, WU Zhenbiao, et al. Research on Urban Heat Island Effect of Dongguan Based on Landsat 8[J]. *Forestry and Environmental Science*, 2014, 30(6): 20-24.

[8] 李海峰, 李永树, 卢正, 等. 河流廊道景观的热环境效应分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2015, 31(4): 51-54.

LI Haifeng, LI Yongshu, LU Zheng, et al. Analysis on the Thermal Environment Effect of River Corridor Landscape[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2015, 31(4): 51-54.

[9] 历华, 杜永明, 柳钦火, 等. 天宫一号数据地表温度反演及其在城市热岛效应中的应用[J]. *遥感学报*, 2014, 18(s1): 133-143.

- LI Hua, DU Yongming, LIU Qinhua, et al. Land surface temperature retrieval from Tiangong-1 data and its applications in urban heat island effect[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(s1): 133-143.
- [10] 高铭, 张善从, 李盛阳. 天宫一号高光谱成像仪遥感应用[J]. *遥感学报*, 2014, 18(s1): 2-10.
- GAO Ming, ZHANG Shancong, LI Shengyang. Tiangong-1 hyperspectral remote sensing and application[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(s1): 2-10.
- [11] 黄小仙, 傅雨田. 天宫一号超光谱仪红外谱段的实验室定标[J]. *遥感学报*, 2014, 18(s1): 35-41.
- HUANG Xiaoxian, FU Yutian. Calibration for the thermal band of hyperspectral imager in Tiangong-1[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(s1): 35-41.
- [12] 韩启金, 傅俏燕, 张学文, 等. 高分一号卫星宽视场成像仪的高频次辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1707-1714.
- HAN Qijin, FU Xiaoyan, ZHANG Xuewen, et al. High-frequency radiometric calibration for wide field-of-view sensor of GF-1 satellite[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1707-1714.
- [13] LI H, LIU Q, DU Y, et al. Evaluation of the NCEP and MODIS Atmospheric Products for Single Channel Land Surface Temperature Retrieval With Ground Measurements: A Case Study of HJ-1B IRS Data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2013, 6(3): 1399-1408.
- [14] Sobrino J A, Jiménez- Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 434-440.
- [15] 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(b10): 129-137.
- QIN Zhihao, LI Wenjuan, Xu Bing, et al. Estimation Method of Land Surface Emissivity for Retrieving Land Surface Temperature From Landsat TM6 Data[J]. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(b10): 129-137.
- [16] 于文凭, 马明国. 应用天宫一号高光谱红外谱段数据反演地表温度产品及验证[J]. *遥感学报*, 2014, 18(s1): 144-151.
- YU Wenping, MA MingGuo. Retrieving the high-spatial-resolution land surface temperature products from the thermal infrared domain of the Tiangong-1[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(s1): 144-151.
- [17] 李盼盼, 李兆富. 基于 HJ-1B 卫星数据的南京市地表温度反演研究[J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(4): 653-660.
- LI Panpan, LI Zhaofu. The Study of Land Surface Temperature Retrieval for Nanjing based on HJ-1B Data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(4): 653-660.
- [18] 朱卫军. 基于单通道算法和 MODIS 数据的地表温度反演研究[J]. *城市勘测*, 2008(5): 97-100.
- ZHU Weijun. Retrieval Land Surface Temperature from MODIS data Base on Single-channel method[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2008(5): 97-100.
- [19] 罗菊花, 张竞成, 黄文江, 等. 基于单通道算法的 HJ-1B 与 Landsat 5 TM 地表温度反演一致性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(12): 3285-3289.
- LUO Jvhua, ZHANG Jincheng, HUANG WenJiang, et al. The Analysis of Consistency between HJ-1B and Landsat 5 TM for Retrieving LST Based on the Single-Channel Algorithm[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(12): 3285-3289.
- [20] 杨学森. 基于单通道算法的 Landsat8 卫星数据地表温度反演研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- YANG Xueshen. Research on the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat8 Data[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [21] 王天星, 陈松林, 马娅, 等. 亮温与地表温度表征的城市热岛尺度效应对比研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(6): 73-77.
- WANG Tianxing, CHEN Songlin, MA Ya, et al. Comparison on Scale Effect of Urban Heat Island Defined by Brightness Temperature and Land Surface Temperature[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(6): 73-77.
- [22] 王舒默. 基于 MODIS 数据的北京近地面气温反演及热岛效应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- WANG ShuMo. Study on Beijing Surface Air Temperature Inversion and the Heat Island Effect Based on MODIS Data[D]. LANZHOU: Lanzhou University, 2015.