

城市热岛效应的卫星遥感分析

王桂玲^{1,2}, 蒋维楣², 魏鸣³

(1. 解放军理工大学 气象学院, 江苏 南京 211101; 2. 南京大学 大气科学系, 江苏 南京 210093;
3. 南京信息工程大学 中美合作遥感中心, 江苏 南京 210044)

摘要: 利用 MODIS 资料研究了 2004 年 4 月南京市热岛特征及其影响因子, 结合地表覆盖类型分析了植被归一化指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、地表温度 (t_s)、地表反照率 (α) 的城乡差异及其相互关系, 探讨了城市热岛 (Urban Heat Island, UHI) 效应形成的机制。结果表明: 南京城区存在着明显的城市热岛效应; 城市平均 t_s 比乡村高约 10.83%; 城市 NDVI 和 α 分别比乡村低约为 62% 和 18.75%; NDVI 与 t_s 呈负相关, 相关系数为 -0.73, 而 NDVI 与 α 之间关系与波段有关; 城乡植被覆盖差异是造成 UHI 的主要原因, 其次是地表反照率。

关键词: 卫星遥感; MODIS; 城市热岛; 地表温度; 植被归一化指数; 地表反照率

中图分类号: P423.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2007)03-0298-07

An Assessment of Urban Heat Island Effect Using Remote Sensing Data

WANG Gui-ling^{1,2}, JIANG Wei-mei², WEI Ming³

(1. Institute of Meteorology, PLAUST, Nanjing 211101, China)

2. Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

3. Sino-America Cooperative Remote Sensing Center, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract Characteristics of the urban heat island (UHI) effect of Nanjing and its cause are investigated by using the MODIS data in April 2004. The surface parameters from the MODIS data include surface temperature (t_s), albedo (α), and normalized difference vegetation index (NDVI). Their heterogeneities over urban and rural area are analyzed based on land cover classification, and their relations are also presented in order to explain the UHI effect. The results show that there exists obvious UHI effect. t_s over urban areas are 10.83% higher than those over rural areas, and NDVI and α over urban areas are by 62% and 18.75% less than those over rural areas, respectively. Surface temperature has significantly negative correlation with NDVI and their correlation coefficient is -0.73. Correlation between NDVI and albedo depends on spectrum of light. Difference in vegetation cover is the primary cause for UHI effect.

Key words remote sensing; MODIS; urban heat island; surface temperature; NDVI; albedo

0 引言

城市的发展导致地表产生了巨大改变, 原先的自然地表被人造地表如金属、沥青和水泥所替代, 从而导致城乡地表热力特性的改变, 使城乡气候环境产生差异。通常将城市气温高于其周围乡村的现象称为城市热岛 (Urban Heat Island, UHI) 效应。城市

热岛效应随着城市的发展而增强, 研究 UHI 变化规律及其形成机制, 对城市发展和规划及减缓城市热岛效应具有重要意义。

目前研究 UHI 方法较多, 从近 10 多年的研究情况来看, 研究方法主要有以下 4 大类, 第 1 类通过城市和郊区的历年气象资料分析研究城市热岛的动态和现状; 第 2 类通过卫星遥感图片、航片资料, 解

释热岛特征; 第 3 类通过数值模拟; 第 4 类通过布点观测。遥感技术作为定期观测地表的有效工具, 早已广泛地应用于 UHI 分布监测。利用卫星遥感地表特征资料是研究 UHI 的有效手段, Roth 等^[1]和 Gallo 等^[2]研究了 UHI 与植被指数关系及 UHI 对最低气温的影响; Owen 等^[3]利用植被覆盖率与土壤有效水分研究了美国宾夕法尼亚州立学院及附近地区城市化影响, Streutker^[4]通过比较 12 a 前后城市热岛测量资料研究了美国休斯顿 UHI 增长。文献 [1-4] 所用的卫星资料都是 AVHRR 资料, 其 1.1 km 分辨率将复杂的城市区域简单地处理成粗糙元, 足以反映城市温度空间分布, 完全可以用于城市热岛形成的研究。近年来, 利用更高分辨率卫星如 Landsat TM、SPOT 等资料研究了许多城市的 UHI 如波兰的洛兹、西班牙的格兰纳达及中国的珠江三角洲^[5-8]。虽然高分辨率卫星资料能反映城市街区尺度, 但其时间分辨率太低, 而且资料不易获得, 所以在应用中受到一定的限制。美国 NASA 发射了对地观测系统 (EOS) 卫星 Terra 和 Aqua, 其目的主要是观测地球大气主要参数及人类对环境的影响, 可以利用装载在这两颗卫星上的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 获得的资料, 根据一定的算法对地表特征进行反演分析。与 Landsat TM 相比, 它具有高时间分辨率和高光谱分辨率的优点, MODIS 每 1~2 d 观测整个地球表面状况, 可获得 36 个光谱通道资料, 这些资料有助于精确地理解全球/区域甚至局地气候变化。目前利用 MODIS 数据研究的领域大多数是区域/全球尺度的气候环境变化^[9-10], 而利用它研究城市热岛效应却较少^[11-13]。

卫星反演获得的地表温度与城市热岛关系密切, 尽管地表温度与近地层气温之间精确的转化关系仍没有确定, 但由卫星遥感获得的信息是目前确定某一区域地表温度 (t_s) 的唯一来源。卫星遥感可以瞬时观测较大的范围, 可以作为城市环境常规监测方法的一个重要补充。本文目的就是利用 Terra 卫星的 MODIS 资料分析和研究城市热岛效应特征及其形成机制。

本文首先对 MODIS 地表产品资料进行预处理, 根据地统计学^[14]中的“重叠移动窗口”统计法剔除因云存在而产生的异常值^[15], 将地表温度与研究区域内 7 个地面自动站实测地表温度进行比较, 以证实 MODIS 地表温度产品的有效性; 然后根据 3 个宽波段 (可见光 0.3~0.7 μm , 近红外 0.7~5.0 μm 以及全波段 0.3~5.0 μm) 的 3 个参数 (f_{iso} , f_{vo} , f_{go}),

根据双向反射率分布函数 (BRDF) 模式反演了三个宽波段的地表反照率, 最后结合地表覆盖类型资料, 分析了 t_s 、NDVI 和 3 个宽波段的地表反照率城乡差异及其相互关系以及对 UHI 形成的作用。

1 研究范围

研究范围是以南京为中心的 83 km × 83 km, 其经纬度范围为 118.36~119.24° E, 31.63~32.37° N, 包括南京城区及其周边地区。该区域内有多种地表覆盖类型: 城市、林地、作物以及水域等。图 1 是研究区域 2004 年 MODIS 地表覆盖类型图, 从图上很容易分辨出穿越南京城区的长江以及玄武湖、紫金山和其他绿色林地。

2 所用的资料

2.1 卫星资料

卫星遥感对于地表特征分析具有很大的潜在功能, 因为它能连续观测较广的范围。本研究选择了研究区域内的 MODIS 资料。MODIS 陆地科学组已经研究了一系列地表产品, 并且全部业务化, 并在网上发布 (<http://edc.in.gov/pub/in-swe/come/>)。本文所用的卫星遥感资料列于表 1, ESDT 表示地球科学资料类型的简写, DOY 表示一年中的第几日。时间为 2004 年 4 月 (代表春季), 研究时段从 3 月 21 日 (DOY 81) 到 5 月 8 日 (DOY 121)。产品中“MOD11A2”为“LST”产品, 空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为 8 d。本文也利用了 MODIS 其他产品包括地表覆盖产品“MOD12Q1”, 植被指数 (NDVI) 产品“MOD13A2”和双向反射率分布函数 (BRDF) 反照率产品“MOD43B1”, “MOD43B1”产品仅提供了双向反射率分布函数 (BRDF) 模式中 3 个权重参数 (f_{iso} , f_{vo} , f_{go}), 它能反映像素点上的各向异性, 本文选用了其中的 3 个宽波段 (0.3~0.7 μm , 0.7~5.0 μm 和 0.3~5.0 μm) 的参数, 计算了这 3 个波段的地表反照率。对不同时间长度的地表温度、植被指数和地表反照率分别求取其月平均, 代表春季特征值, 而地表覆盖类型因为只有一个时次的产品, 所以利用该资料作为春季地表覆盖类型。

对于晴空下 1 km 空间分辨率的 MODIS 的 t_s 精确度定义为 1 K, 并且通过了平坦地表验证。对于不同波段的比辐射率其精确度不同, 如波段 29、31 和 32 为 0.02, 波段 20、22 和 23 为 0.05, 地表

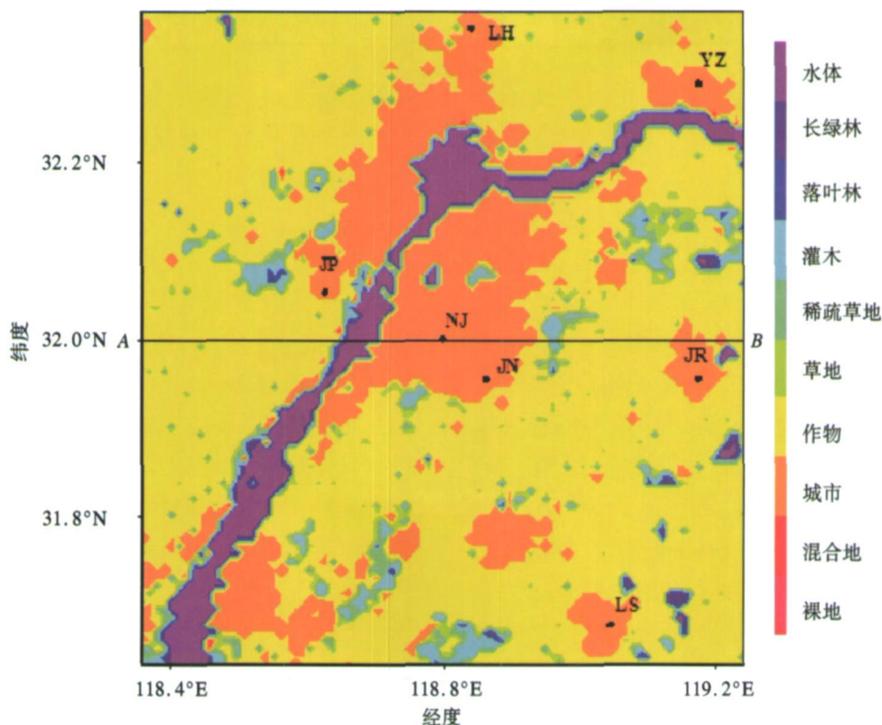


图 1 2004年 MODIS 地表覆盖分类图及自动站位置

Fig 1 Land cover classification from MODIS in 2004 and locations of automatic weather stations

覆盖类型产品“MOD12Q1”提供了基于国际地球生物圈计划 (IGBP) 确定的地表覆盖类型, 每一种分类都有其质量评估, 关于 MODIS 产品的更多信息可以由 <http://modis.gsfc.nasa.gov/data> 获得。资料所用的投影方式为常规正弦投影, 格式是 HDF-EOS。文中通过利用 MODIS Reprojection Tool (MRT v2.4 Beta) 转化为兰勃特正形投影, 数据格式转为二进制格点格式。

表 1 选用的 2004 年 MODIS 产品及其时空分辨率

Table 1 Selected MODIS products and their spatial and temporal resolutions

资料类型 (ESDT)	产品名称	时间分辨率 /d	日期 (DOY)	空间分辨率 /km
MOD11A2	地表温度	8	089, 097, 105, 113, 121	1
MOD12Q1	地表覆盖类型	96	—	1
MOD13A2	植被指数	16	081, 097, 113	1
MOD43B1	反照率	16	081, 097, 113	1

2.2 气象资料

本文利用了 7 个自动站 (Automatic Weather Station, AWS) 的地温资料, 各站点在研究区域中对应的位置见图 1, 其经纬度见表 2。

表 2 7 个自动站地理位置

Table 2 Locations of seven automatic weather stations

站号	站名	经度 /°E	纬度 /°N	地形高度 /m
58235	六合 (LH)	118.85	32.20	12.2
58237	江浦 (JP)	118.37	32.03	8.9
58238	南京 (NJ)	118.80	32.00	12.0
58242	仪征 (YZ)	119.17	32.28	10.5
58333	江宁 (JN)	118.51	31.57	22.1
58340	溧水 (LS)	119.02	31.39	25.5
58344	句容 (JR)	119.10	31.57	26.1

3 MODIS 地表温度及其验证

根据 MODIS 地表温度的空间分布, 一些温度较高的区域即 UHI 很容易辨认出来 (图 2)。为了解释地表温度分布, 在图中同时标出地形高度, 由图 2 可见南京主城区存在较强的 UHI, 在南京地区附近的城镇如安徽省马鞍山市 (位于图的左下角)、句容、溧水也存在 UHI, 而在南京城东及西南部并没有

出现 UHI 显然, 这两个地区地形较高, 与该处的紫金山及雨花台公园有关, 那里的林地和作物地抑制了 UHI 的形成。

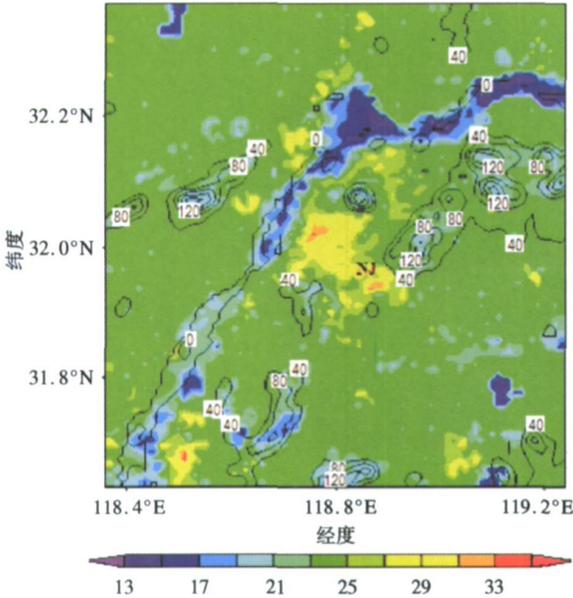


图 2 地形高度(单位: m)和 2004 年 4 月白天 10:30 MODIS 月平均地表温度(单位: °C)

Fig. 2 Terrain height(m) and monthly average ground surface temperature t_s (°C) from MODIS at about 10:30 LT(local time) in daytime in April 2004

仅根据卫星遥感图片精确地解释某地区地表特征是比较困难的, 因为这里包括许多复杂因子, 控制 UHI 因子除了地表覆盖类型外, 城市形态分布和城市内道路建筑等各类地表也有影响。每种地表类型具有独特的辐射、热力、湿度和动力特征, 并且与周围地理环境有关, 所以使许多人感到困惑的是由多种地表类型混合后的空间复杂性^[16], 很难得出通用性的结论, 但有一点可以肯定的是植被覆盖率与 UHI 的强弱有着密切的关系。

利用自动站 4 月白天 10:30 月平均地表温度与 MODIS 反演的地表温度进行了比较, 结果见表 3。Δ t_s 表示 MODIS 地表温度与 AWS 地表温度之差, δ 表示相对误差。由表 3 可见误差较小, 相对误差在 -8.76% ~ 2.39%, 而且大多数为负值, 这说明 MODIS 地表温度比 AWS 低些。

表 3 MODIS 与 AWS 的 2004 年 4 月白天 10:30 地表温度比较结果

Table 3 Comparison of monthly average t_s at about 10:30 LT in April 2004 from MODIS with AWS

站名	$t_s / ^\circ\text{C}$		$\Delta t_s / ^\circ\text{C}$	$\delta / \%$
	MODIS	AWS		
六合	26.04	28.54	-2.50	-8.76
江浦	26.08	25.47	0.61	2.39
南京	27.50	27.53	-0.03	-0.11
仪征	26.18	28.18	-2.00	-7.10
江宁	26.68	27.09	-0.41	-1.51
溧水	28.04	27.90	0.14	0.50
句容	27.30	28.72	-1.42	-4.94

4 α t_s 与 NDVI 的关系

4.1 NDVI

植被归一化指数 NDVI 是描述地表植被特征的重要指标, NDVI 通常范围为 -0.1 ~ 1。由图 3 可见, 城市和建筑地区具有较低 NDVI 值, 变化范围为 0.2 ~ 0.4 周围其他小城镇也出现相似情形, 区域平均城乡 NDVI 差为 0.31。

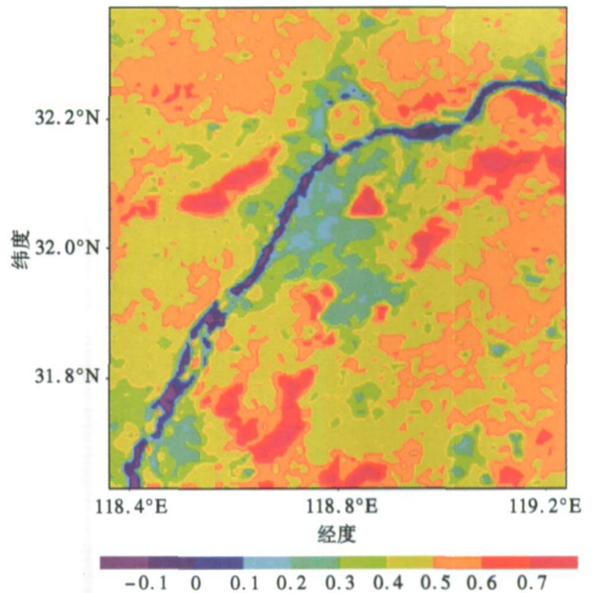


图 3 2004 年 4 月由 MODIS 获得的月平均 NDVI 分布
Fig. 3 Monthly average NDVI from MODIS in April 2004

4.2 反照率 α

本文中利用了 3 个宽波段 (可见光 0.3 ~ 0.7 μm , 近红外 0.7 ~ 5.0 μm 以及全波段 0.3 ~ 5.0 μm) 的 3 个参数 (f_{sox} , f_{vok} , f_{geo}), 根据双向反射率

分布函数 (BRDF) 模式^[17] 计算出任一太阳天顶角时的“黑空”(全部是直射光)反照率 α_{bs} 和“白空”(全部是散射光)反照率 α_{ws} , 再根据 α_{bs} 和 α_{ws} 计算实际大气状态下的 3 个宽谱段的反照率 $\alpha(\theta_s, \lambda)$, 分别用 α_{vis} 、 α_{nir} 和 α_t 表示可见光波段 (0.3~0.7 μm)、红外波段 (0.7~5.0 μm) 和全波段 (0.3~5.0 μm) 地表反照率, 下面是整个计算过程^[12]。

首先利用以下多项式及 3 个参数估算出“黑空”反照率 α_{bs} , 该模式可求任一太阳天顶角下较高精度的 α_{bs} :

$$\alpha_{bs}(\theta_i, \lambda) = f_{iso}(\lambda)(g_{0iso} + g_{1iso}\theta_i^2 + g_{2iso}\theta_i^3) + f_{vol}(\lambda)(g_{0vol} + g_{1vol}\theta_i^2 + g_{2vol}\theta_i^3) + f_{geo}(\lambda)(g_{0geo} + g_{1geo}\theta_i^2 + g_{2geo}\theta_i^3) \quad (1)$$

其次计算“白空”反照率 α_{ws} , 可用如下方程求得:

$$\alpha_{ws}(\lambda) = f_{iso}(\lambda)g_{iso} + f_{vol}(\lambda)g_{vol} + f_{geo}(\lambda)g_{geo} \quad (2)$$

这里 θ_i 和 λ 分别是太阳天顶角和波长。 g_{iso} 、 g_{vol} 、 g_{geo} 分别为计算散射时各向均匀散射 (iso)、体散射 (vol)、几何光学散射 (geo) 三部分常数, 其值见文献 [17]。

最后计算实际大气状态下的反照率 $\alpha(\theta_s, \lambda)$, 计算公式如下:

$$\alpha(\lambda, \theta_s) = (1 - s(\theta_s, \tau(\lambda)))\alpha_{bs}(\lambda, \theta_s) + s(\theta_s, \tau(\lambda))\alpha_{ws}(\lambda) \quad (3)$$

$s(\theta_s, \lambda)$ 是散射光函数, 为光学厚度 $\tau(\lambda)$ 的函数, 通过查算表求得。查算表是根据 6S 辐射程序 (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) 计算得出 MODIS 7 个窄谱段和 3 个宽谱段散射光制定的, 该表可从 MODIS BRDF/Albedo 产品网址 (<http://geography.bu.edu/brdf/userguide/tools.html>) 获得。

计算实际大气状态下的反照率时选取气溶胶类型为陆地气溶胶, 其光学厚度采用了罗云峰等^[18] 得出的中国地区 1979—1992 年 12 a 的月平均气溶胶光学厚度资料。由 $\tau(\lambda)$ 产生反照率的误差很小, 仅为 0.003^[19]。太阳高度角则根据 MODIS 过境时的时段内平均太阳高度角, 由查算表可以分别获得 3 个宽谱段对应的散射光函数, 根据方程 (3) 计算出 3 个宽谱段的实际反照率。图 4 为 2004 年 4 月全短波段 (0.3~5.0 μm) 月平均反照率 (可见光和近红外波段的反照率分布图略)。验证反照率同样很重要, 已有研究者^[20] 对地表反照率产品通过尺度放大法进行初步验证, 验证结果表明这些产品精确度较

高, 相对误差通常小于 5%。本文计算得出的城市区域平均反照率为 0.13, 该结果与其他研究^[21] 基本一致。

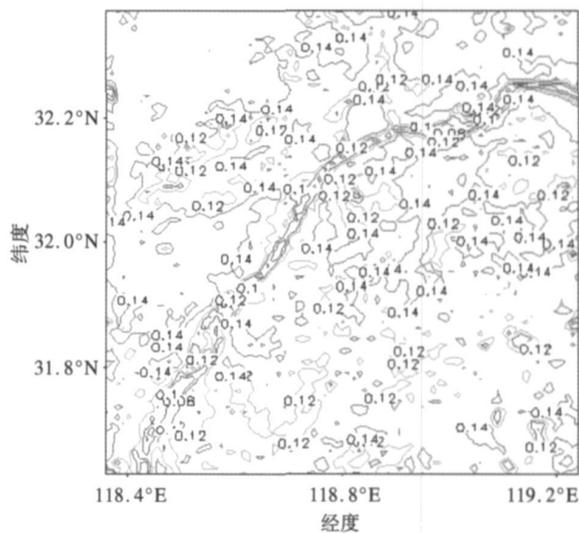


图 4 2004 年 4 月 MODIS 全波段 (0.3~5.0 μm) 月平均反照率

Fig 4 Monthly average albedo in total broadband (0.3~5.0 μm) from MODIS in April 2004

4.3 结果分析

经过研究区域中心的水平截面 AB (图 1), 利用该处的廓线分析 UHI 与城乡地表特征差异。地表特征量主要有 NDVI、3 个宽谱段的 α 和 t_s , 从图 5 上可以看到起伏不平的廓线, 有多处“峰”、“谷”, 表明了地表特征的非均匀性。

图 5a 表示了 NDVI 与 3 个宽谱段的反照率之间关系及其随地表类型变化, 由此图可以得出如下结论: 可见光波段 (0.3~0.7 μm) 地表反照率 α_{vis} 城市大于乡村, 而近红外波段 (0.7~5.0 μm) 地表反照率 α_{nir} 和全波段 (0.3~5.0 μm) 地表反照率 α_t 小于乡村, NDVI 与 α_{vis} 、 α_{nir} 、 α_t 之间相关系数分别为 -0.80、0.83、0.12。这种现象主要是由于植被对不同波段的太阳光作用不同。在植物分布密集地区, 叶绿素的光合作用强度大, 对可见光有很强的吸收作用, 从而其反射率变小, 而植物叶片的细胞结构对近红外辐射有很强的反射作用, 城区植被少于乡村, 由此可得, α_{vis} 城区大于乡村地区, 而 α_{nir} 则是城区小于乡村, 这与周淑贞及 Brest 研究的结论是一致的^[22]。不同地表类型空间分布型式如水面、城市和建筑物及林地等导致了 UHI 的形成, 由图 5b 可知, 地表温度在城市区域出现峰值, 可见 UHI 存在; NDVI 与 t_s 之间存在负相关, 两者的相关系数达

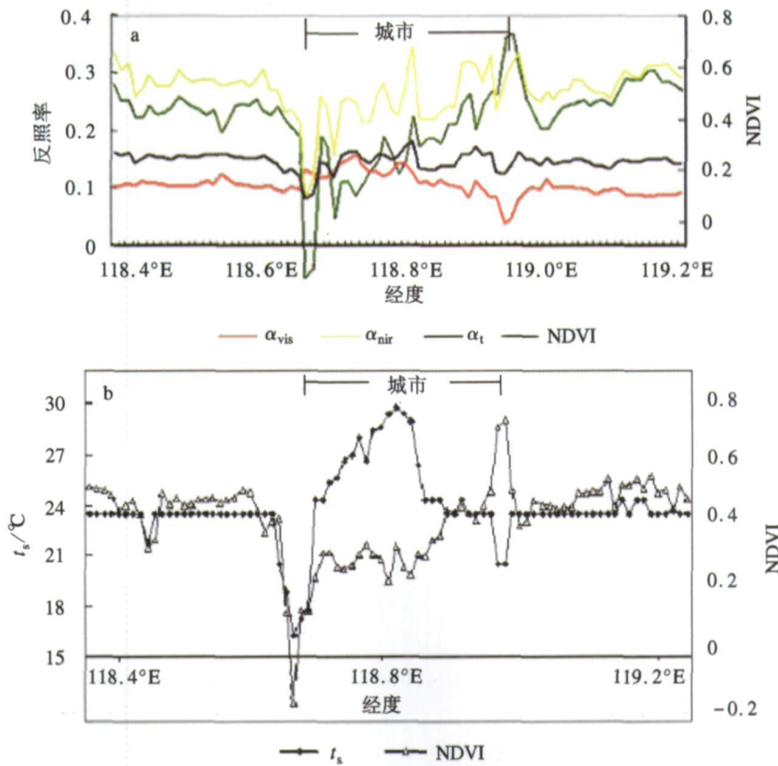


图 5 NDVI 与 3 个宽谱段的反照率及地温 t_s 在水平廓线 AB 上的分布

a NDVI 与 3 个宽谱段的反照率; b NDVI 与地温 t_s

Fig. 5 Zonal profiles of NDVI and (a) albedos in three broadband and (b) surface temperature t_s along transect AB in Fig. 1

- 0.73。许多研究者^[23-25]也发现这种关系存在于不同类型的生态系统中。NDVI 反映了光谱反射特征及植被密度, 而地表温度 t_s 则与地表有效水分、蒸发蒸腾量及当地气候因子等有关^[26], 因此通过对这类廓线分析有助于确定城乡地表特征之间的差异。

结合 MODIS 地表覆盖类型资料分析城乡 t_s 、NDVI 和 α_t 差异, 表 4 为分析结果, 此处城、乡地表特征值分别为城市和作物两种地表类型平均值。

表 4 城乡月平均 t_s 、NDVI 和 α_t 的比较

Table 4 Comparison of monthly average t_s , NDVI and α_t over urban area with those over rural area

	地表温度 / $^{\circ}\text{C}$	植被指数	地表反照率
城市	23.44	0.19	0.13
乡村	21.15	0.50	0.16
变化量(城减乡)	2.29	-0.31	-0.03

从城乡平均地表特征相对变化率来看, 城市平均 t_s 比乡村高约 10.83%, 城乡平均差异为 2.29 $^{\circ}\text{C}$; 城市地区 NDVI 和 α_t 分别比乡村低约为 62% 和 18.75%, 城乡平均差分别为 0.31 和 0.03。

5 结论

(1) MODIS 地表温度与地面自动站实测地表温度具有较好的一致性, 根据 MODIS 地表温度资料分布, 南京地区存在着明显的 UHI 现象。

(2) NDVI 与 t_s 呈负相关, 相关系数为 -0.73, α 与 NDVI 之间关系与波段有关, α_{vis} 与 NDVI 呈负相关, 其相关系数为 -0.80, α_{nir} 与 NDVI 为正相关, 其相关系数为 0.83。

(3) 城市平均 t_s 比乡村高约 10.83%, 城乡平均差异为 2.29 $^{\circ}\text{C}$; 城市地区 NDVI 和 α_t 分别比乡村低约为 62% 和 18.75%, 城乡平均差分别为 0.31 和 0.03。

这些结果说明了利用卫星遥感地表参数是研究城市热岛的有效手段, 城乡植被覆盖差异是造成城市热岛(UHI)的主要原因, 其次是地表反照率。通过提高植被覆盖率和地表反照率, 可以降低城市地表温度, 有效地抑制城市热岛效应。本文的研究为进一步利用遥感资料从地表能量分配角度研究 UHI 形成机制提供了一定的基础。

参考文献:

- [1] Roth M, Oke T R, Emery W J. Satellite derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology [J]. International Journal of Remote Sensing, 1989, 10(11): 1699-1720.
- [2] Galb K P. The use of a vegetation index for assessment of the urban heat island effect [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(11): 2223-2230.
- [3] Owen T W, Carlson T N, Gillies R R. An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(9): 1663-1681.
- [4] Streutker D R. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas [J]. Remote Sens Environ, 2003, 85(3): 282-289.
- [5] Klysk K, Fortunak K. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódź, Poland [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(24/25): 3885-3896.
- [6] Montez J P, Rodriguez A, Jimenez J I A. Study of the urban heat island of Granada [J]. Int J Climatol, 2000, 20(8): 899-911.
- [7] Weng Q. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2003, 69(5): 555-566.
- [8] Weng Q, Lu D, Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies [J]. Remote Sens Environ, 2004, 89(4): 467-483.
- [9] Zhu A, Li C, Liu G, et al. Validation and application of MODIS remote sensing aerosol information in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(1): 86-90.
- [10] Keith W O, Gordon B B, Schaaf C B, et al. Assessment of global climate model land surface albedo using MODIS data [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(8): 1443-1447.
- [11] Wei M, Wang G, Jiang W, et al. Surface temperature analysis in urban area using MODIS [J]. Proceeding of SPIE, 2006 (6199): 32-40.
- [12] Wang G, Jiang W, Wei M, et al. Analysis of urban/rural albedo from MODIS over East China [J]. Proceeding of SPIE, 2006 (6199): 123-134.
- [13] 王桂玲. 地表特征的卫星遥感参数化及大气边界层结构的研究 [D]. 南京: 南京大学大气科学系, 2005.
- [14] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [15] 孙涵, 孙照渤, 李亚春. 雾的气象卫星遥感光谱特征 [J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(3): 289-301.
- [16] 杨金红, 尹球, 顾松山. 城区高光谱遥感数据假彩色波段组合研究 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 289-295.
- [17] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semi-empirical BRDF models [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2000, 38(1): 977-998.
- [18] 罗云峰. 中国地区气溶胶光学厚度特征及其辐射强迫和气候效应的数值模拟 [D]. 北京: 北京大学地球物理学系, 1998.
- [19] 王开存, 刘晶森, 周秀骥, 等. 利用 MODIS 卫星资料反演中国地区晴空地表短波反照率及其特征分析 [J]. 大气科学, 2004, 28(6): 941-949.
- [20] Liang S. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: methods and preliminary results [J]. Remote Sens Environ, 2002, 83(1/2): 149-162.
- [21] 徐兴奎. 长江三角洲地区地表月平均反照率的卫星遥感研究 [J]. 大气科学, 2002, 26(3): 394-400.
- [22] 周淑贞, 束炯. 城市气候学 [M]. 北京: 气象出版社, 1994.
- [23] Nomani R, Running S. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal AVHRR data [J]. J Appl Meteor, 1989, 28(4): 276-284.
- [24] Smith R C G, Choudhury B J. Analysis of normalized difference and surface temperature observations over southeast Australia [J]. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12(10): 2021-2044.
- [25] Boegh E, Soegaard H, Thomsen A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface [J]. Remote Sens Environ, 2002, 79(2/3): 329-343.
- [26] 杨宝钢, 丁裕国. 考虑植被的热惯量法反演土壤湿度的一次试验 [J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(2): 218-223.