

## MODIS 数据以及变分订正技术在长沙 城市热岛特征分析中的应用

屈右铭<sup>1,2</sup>, 蔡荣辉<sup>1</sup>, 霍林<sup>3</sup>, 汤宇<sup>4</sup>, 李晶<sup>1</sup>

(1.湖南省气象科学研究所, 湖南 长沙 410007; 2.南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044; 3.长沙市气象局, 湖南 长沙 410007; 4.湖南省防雷中心, 湖南 长沙 410007)

**摘要:** 利用 EOS/MODIS 遥感信息反演地表温度和植被覆盖指数, 引进新的变分订正方案, 利用常规气象资料, 对高分辨率地表温度场实施订正, 对长沙市热岛(UHI)空间分布规律及影响因子进行研究. 通过分析长沙城市地区的土地覆盖、植被绿地状况与热岛空间分布状况的关系, 揭示出研究区域 UHI 主要特征为: (1) 从研究区域地表覆盖图发现, 长沙市城区四周均有相对地势较高的山地, 但地形梯度不大, 接近四面环山的地貌特征, 容易造成城区的热量聚集, 有利于城市热岛效应的形成, 使得长沙城区存在明显的热岛分布; (2) UHI 分布与城市结构的轮廓相一致, 长沙城区与地势相对平坦的近郊区的地表温度差异为 3~5 °C, 与地势较高的周边远郊区的地表温度差异为 6~8 °C, 长沙城区热岛效应与城市规划呈对应关系, 热岛效应最显著的区域为二环线内, 并从中心沿三环逐渐向郊区减弱; (3) 地表覆盖类型对 UHI 的效应明显, 长沙地区植被绿地状况与 UHI 呈现明显反相关分布, 揭示出植被绿地对降低 UHI 具有重要的作用, 大范围的绿地建设能有效降低 UHI.

**关键词:** 城市热岛效应; 中分辨率成像光谱仪; 变分订正; 地表温度

中图分类号: Q407.8 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2010)01-0100-06

## On urban heat island effect in Changsha based on MODIS data and the new variational processing method

QU You-ming<sup>1,2</sup>, CAI Ronghui<sup>1</sup>, HUO Lin<sup>3</sup>, TANG Yu<sup>4</sup>, LI Jing<sup>1</sup>

(1. Institute of Meteorology in Hunan Province, Changsha 410007, China; 2. School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China; 3. Changsha Weather Bureau, Changsha 410007, China; 4. Hunan Lightning Protection Center, Changsha 410007, China)

**Abstract:** The land surface Temperature(LST) and vegetation index were derived from EOS/MODIS data, and the high resolution LST was corrected by AWS(automatic weather station) data according to a new variational processing method, the character of the urban heat island(UHI) of Changsha and its causes are investigated. By the study of the relationship between vegetation and spatial characteristics of UHI, the mainly spatial characteristics of UHI has been analyzed and it was: (1) The terrain of the suburbs is higher than the urban region, the gradient of the terrain height is small, and this geomorphological feature is conducive to assemble of the heat, the UHI phenomenon of Changsha is obvious especially in the summer night; (2) The UHI distribution is similar to the outline of the urban construction. The LST of urban is 3~5 °C higher than the flat low areas close around the city, and 6~8 °C higher than further areas. The region which has the most obvious UHI phenomenon is the region surrounded by the second city ring road, and the UHI phenomenon gradually weakened from the city centre to suburb; (3) The impact of geomorphological character to UHI is notable, the relationship between vegetation index and UHI is Anti-related, it was indicated that the improvement of the vegetational status is very important to the elimination of UHI phenomenon, the implementation of the urban green land planning can reduce UHI effect.

**Key words:** urban heat island; MODIS data; variational processing method; land surface temperature

城市的发展导致自然地表被人造地表如金属、沥青和水泥所替代, 使得城乡地表热力特性发生改

收稿日期: 2009-05-18

基金项目: 湖南省科技重大专项(2008FJ1006)

作者简介: 屈右铭(1980—), 男, 湖北麻城人, 硕士研究生, 工程师, 从事生态气象研究, 5688056@qq.com

变,使城乡气候环境产生差异.这种由于城市地表改变而引起同期城市空气和地表温度(LST)比郊区高的现象称为城市热岛(UHI)效应,170年前由Howard提出<sup>[1]</sup>.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<sup>[2]</sup>.

目前UHI的研究方法有多种<sup>[3]</sup>.遥感技术作为定期观测地表的有效工具,早已被广泛应用于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,美国科学家最早应用其反演的植被覆盖来研究UHI<sup>[4-5]</sup>.1.1 km分辨率的AVHRR卫星资料通过将复杂的城市区域简单地处理成粗糙元来反映城市温度空间分布,研究城市热岛的形成,国内学者利用AVHRR遥感卫星数据研究了北京、上海等几个大城市的城市热岛效应<sup>[6-7]</sup>.近年来,利用更高分辨率卫星如TM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<sup>[8]</sup>,以及中国北京、上海、南京等城市<sup>[9-10]</sup>.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发射的对地观测系统(EOS) Terra和Aqua卫星1~2 d观测整个地球表面状况,利用其装载的中分辨率成像光谱仪(MODIS)可获得36个光谱通道资料,根据一定的算法对地表特征进行反演分析,可以实现对区域/全球尺度的气候环境变化观测<sup>[11]</sup>.与LandsatTM相比,具有高时间分辨率和高光谱分辨率的优点,但利用其研究城市热岛效应却较少<sup>[12]</sup>.

由于城市下垫面地表特征复杂,大气对地表辐射的削弱等因素的复合影响,使得根据卫星资料估算地表温度成为一个非常复杂的问题<sup>[13-14]</sup>.柏晶瑜等<sup>[15]</sup>将晴空TBB (temperature of blackbody on the top of cloud)资料进行变分技术处理,对青藏高原地温场进行了变分分析,结果表明,在复杂的地形特征、大气衰减等多种因子影响下,通过变分处理技术得到的订正结果可以提高青藏高原地区地温场信息的客观性与青藏高原下垫面热力状况的描述能力.王桂林等<sup>[3]</sup>采用南京市自动气象站地面温度实测资料,运用变分订正方法,对MODIS反演的地

表温度场进行验证,结果说明利用卫星遥感地表参数是研究城市热岛的有效手段.笔者考虑到城市下垫面复杂的地表特征及云、大气衰减等因素对EOS/MODIS数据反演地表温度的影响,采用晴空过程长沙城区及近郊区中小尺度自动站AWS (automatic weather station)气温观测真值对其进行变分订正,研究长沙城市热岛效应空间分布特征并分析其形成机制.

## 1 研究区域概况

由于没有采用GIS空间分析技术,考虑到研究方便以及研究区的具体发展情况,截取了主要市区和部分郊区为长沙市研究区域,研究范围以长沙市区为中心的40 km×40 km的矩形区域,位于湖南省东部偏北的湘江下游与长浏盆地西缘<sup>[16]</sup>,地理位置112.80°E~113.20°E,28.40°N~28.00°N,包括长沙市区及其周边望城县和长沙县部分地区.该区域内有多种地表覆盖类型:城市、林地、作物以及水域等<sup>[17]</sup>.从一些学者的前期相关研究成果看,研究区域主要地表覆盖类型为城市建设用地、林地、田地和水域,其中城市建设用地主要在核心城区,林地分布在四周山地;田地主要分布在核心城区周边的郊区、湘江水域以及地势较低的山谷区域,水域主要有湘江、浏阳河和部分湖泊<sup>[18]</sup>.长沙市区四周均有地势较高的山地,四面环山的地貌特征容易造成城区的热量聚集,有利于城市热岛效应的形成.

历华等<sup>[17]</sup>利用MODIS数据与TM影像相结合的方法,对长沙市和长株潭城市群的城市热岛效应进行研究,结果表明,7-9月城市热岛效应最显著,但也有学者利用气象部门提供的观测数据统计发现,长沙在秋冬季也有很强的城市热岛强度<sup>[19]</sup>.利用气象部门AWS观测资料分析发现,在6-10月间均有不同强度的城市热岛,并发现夜间的热岛强度较为明显<sup>[19-20]</sup>.考虑获取同期的晴空MODIS资料以及降水影响(长沙市9月下旬后降水量减少,低云量日多<sup>[20]</sup>),选取的时间段为降水较少的10月,选择了研究区域内的2008年10月14日的湖南省气象局通

过FENGYUNCast系统自行接收的EOS/MODIS晴空资料(图1)。

首先对MODIS资料进行预处理,包括前期自动预理解包和归整,高精度定位处理,多通道定标预处理和1B(HDF)文件格式生成,将HDF文件进行投影生成成为LD2的投影文件,再采用可见光进行太阳高度订正和去条纹处理.采用分布函数拟合的方法,选取一个或多个光谱响应状态良好的探测器为基准,统计各探测器取值的概率分布函数,再依照基准探测器的分布函数进行校正。

## 2 地表温度场的生成与变分订正

### 2.1 归一化植被指数场的生成

以 MODIS 遥感影像资料为主要数据源,分析城市土地利用格局变化情况<sup>[21]</sup>.植被归一化指数 *NDVI* 是描述地表植被特征的重要指标,通常为 0~1.利用 2008 年 10 月 14 日白天的 MODIS 资料 1、2 通道亮温反演出 *NDVI* 值.由图 2 可见,城市和建筑地区具有较低的 *NDVI* 值,为 0.1~0.3,周围其他小城镇也出现相似情形,区域平均城乡 *NDVI* 值差为 0.2 左右,湘江水体由于水体判识阈值的调整,部分也被识别为低 *NDVI* 值区域。

### 2.2 地表温度场的生成

卫星的热红外观测揭示了 LST 在大时空尺度上的变化格局,它是地表能量平衡、水文循环、生态系统模型等的重要参数.由于昼夜热红外温度与

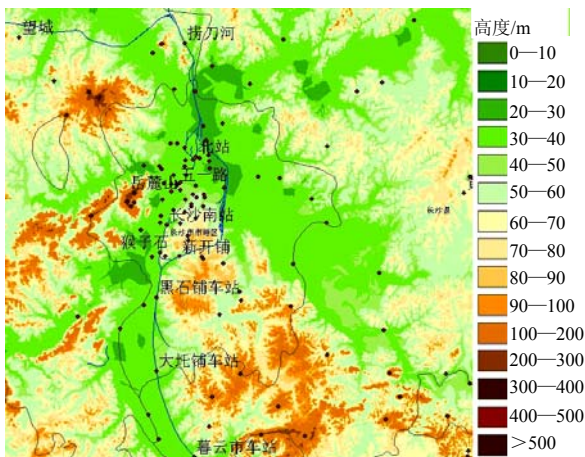


图 1 研究区域地形高程图  
Fig.1 The terrain elevation map of analyzed region

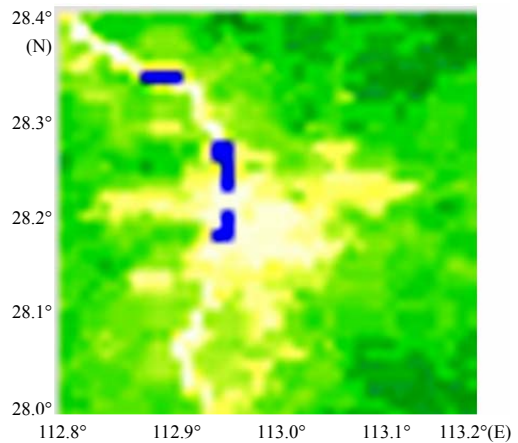


图 2 2008-10-14 MODIS 资料反演的长沙市 *NDVI* 分布  
Fig.2 The *NDVI* was derived from MODIS data of Changsha at Oct. 14, 2008

平均气温具有非常一致的季节变化趋势,可以很好地反映空间区域的温度差异<sup>[22]</sup>.LST 反演算法,目前常用的方法就是分裂窗算法(Split Windows)<sup>[23]</sup>,该算法利用大气窗口 10~13 μm 两相邻通道(11~12 μm)上大气的吸收作用不同,由两通道测量值的各种组合来消除大气的影<sup>[24-26]</sup>.UHI 由 MODIS 反演的长沙市及其周边地区的 LST 来测量.晴空条件下,MODIS 反演 LST 的分裂窗算法如下<sup>[2, 27]</sup>:

$$LST = C + (A_1 + A_2 \frac{1-\epsilon}{\epsilon} + A_3 \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon}) \frac{T_{31} + T_{32}}{2} + (B_1 + B_2 \frac{1-\epsilon}{\epsilon} + B_3 \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon}) \frac{T_{31} - T_{32}}{2} \quad (1)$$

式中,  $\epsilon = 0.5(\epsilon_{31} + \epsilon_{32})$  和  $\Delta\epsilon = \epsilon_{31} - \epsilon_{32}$ , 分别是MODIS 31和32通道的地表比辐射率的平均值和差值,  $T_{31}$ 和 $T_{32}$ 分别是这两个分窗通道的亮度温度.系数 $C, A_i$ 和 $B_i(i=1, 2, 3)$ 通过统计大范围的地表和大气条件下辐射传输计算的MODIS模拟数据的线性回归得到。

可使用 Valor 和 Casselles 提出的地表发射率估算式<sup>[27]</sup>求出 $\epsilon$ ,方程式如(2)与(3)式,其中 $\epsilon_{31}, \epsilon_{32}$  是代表MODIS31、32通道的地表发射率,地表温度反演采用夜间的晴空MODIS资料,只有21~36通道的数据,*NDVI*值由同一天的白天晴空MODIS资料反演得到。

$$\epsilon_{31} = 0.9897 + 0.029 \ln NDVI \quad (2)$$

$$\epsilon_{31} - \epsilon_{32} = 0.01019 + 0.01344 \ln NDVI \quad (3)$$

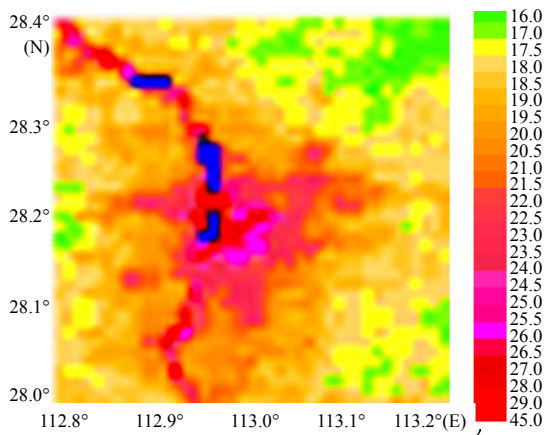


图 3 2008-10-14 MODIS 资料反演的 LST 场

Fig.3 The LST was derived from MODIS data at 22:00, Oct 14, 2008

### 2.3 变分订正方法

常见的变分校准方案需要将校准参照变量插值到被校准变量的格点上<sup>[28]</sup>。由于研究所采用的自动站数据收集不完整，造成参照变量分布不均匀，变分校正时会把这个虚假的梯度引入，影响校准效果，从而导致订正后数据的空间分布产生误差。另外，稀疏的参照值插值本身也存在困难，特别是在边界和大量无资料区(如海洋区域)。本研究借鉴了新的订正方案，不需要对参照值进行整场插值，克服了将稀疏的参照点插值到高分辨率遥测资料的格点(分析格点)上带来的虚假梯度等问题。在保持AWS气温资料的高分辨空间分布形态基本不变的同时，修订其系统性偏差，提高了数据的可用性和准确性<sup>[29]</sup>。新的变分订正方案，构造一个泛函，使其辅助积分宗量<sup>[30]</sup>为：

$$F^* = \alpha(V - \sum_{i=1}^{Nstm} W_i V_i^0)^2 W + \beta(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial \tilde{V}}{\partial x})^2 + \beta(\frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial \tilde{V}}{\partial y})^2$$

其中  $V$  为气象遥感资料修订值， $\tilde{V}$  为气象遥感资料未修订值， $V_i^0$  为订正参考量， $W_i$  为订正参考量到给定分析订正格点的权重系数， $W$  为订正参考量对给定分析订正格点的总影响权重， $\alpha$ 、 $\beta$  为给定系数。

定义权重系数  $W_i = \frac{(R^2 - r_i^2)}{R^2}$ ， $R$  为参考点最大影响半径， $r_i$  为参考点到给定分析订正格点的距离。

由  $W = \sum_{i=1}^{Nstm} W_i$  可推导出响应的 Euler 方程<sup>[31]</sup>：

$$\alpha W V - \beta \nabla^2 V = \alpha \sum_{i=1}^{Nstm} W_i V_i^0 - \beta \nabla^2 \tilde{V}$$

其中  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  为二维拉普拉斯算子平方，

由于在本研究中使用的是前差，所以给定初始条件，上边界和左侧边界的修订值的梯度与未修订值的梯度相等，而且由于本次实验只是在大范围的 LST 场中筛选了一块区域，所以选定区域边界的梯度存在，可以不等于 0。利用迭代法可以求解上述方程，从而可得到订正后的气象遥感资料  $V$ 。

### 3 长沙市热岛特征分析

相关研究成果表明，高程越低，坡度越小，越有利于热岛中心的形成<sup>[32]</sup>。长沙市城区四周虽然有地势相对较高的山地，但最高处也只有 300 m 左右，地形梯度小，接近四面环山的地貌特征容易造成城区的热量聚集，使得长沙城区存在明显的热岛分布，夏季初秋夜间具有较强的热岛效应。地表覆盖类型对 UHI 的效应明显，长沙核心城区人口密集，高楼众多，下垫面多为水泥和沥青，植被覆盖差，含水性极差，而下垫面性质差异是影响城市热岛形成的最主要因素<sup>[35]</sup>。这些因素导致核心区温度明显高于其他地区，地表植被绿地状况与 UHI 呈现明显反相关分布(图略)。

利用 EOS/MODIS 数据反演得到的 LST 场能够更好地反映城市热岛的主要特征，并对该特征进行局部放大(图 3)。长沙核心城区的热岛延伸到东北角，该区域也存在一个高温区，因为该区域为长沙县星沙开发区所在地，是主要的工业聚集区。另外可以看到，岳麓山对长沙城市热场的调节作用，在长沙市核心城区的左侧，湘江的西岸存在一块相对地势较高的岳麓山区域，是植被指数高值区(图 2)，是长沙城区存在的唯一一个冷岛，表明大面积植被有助于改善城市的热环境。据研究，大面积水域有助于降低城市热岛效应，但由于 10 月中旬湘江处于枯水期，大部分河床裸露，因此在 LST 场中未发挥显著作用。

经变分订正后的 LST 场综合了初始场和 AWS 气温场的分布特征，明显改善了 MODIS 初始 LST 场的梯度，使得反演得到的结果在数值上更接近实况(图 5)。UHI 分布与城市结构的轮廓相一致，长



沙城区与地势相对平坦的近郊区的地表温度差异为  $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，与地势较高的周边远郊区的地表温度差异为  $6\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，长沙城区热岛效应与城市规划呈对应关系，热岛效应最显著的区域为二环线内，并从中心沿三环逐渐向郊区减弱。

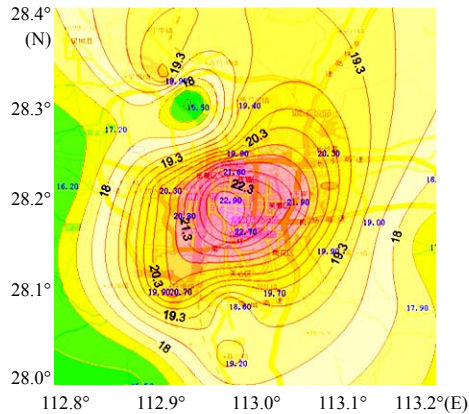


图4 MODIS卫星的过境时段的AWS温度场

Fig.4 The distribution of the temperature based on AWS data at the time when the satellite gone across

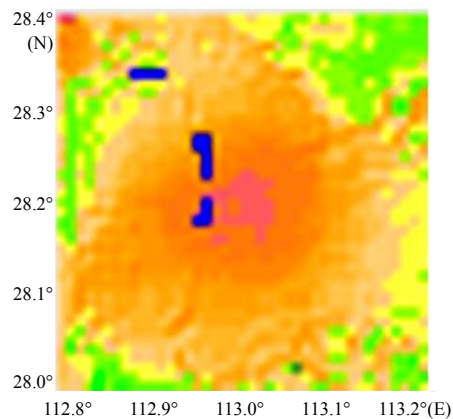


图5 经AWS数据变分订正后的LST场

Fig.5 The distribution of the LST which has been variational processed by AWS data

#### 4 结论与讨论

利用MODIS卫星资料反演了长沙市区域的LST场，结果表明，该区域存在明显的热岛效益，反映的热岛分布与实际情况基本相符，但还存在以下问题。

(1) 利用卫星遥感资料反演亮温场数值大小与实际气温还存在一定的差异，主要是由于在地表覆盖类型异常复杂，植被覆盖极低( $<0.08$ )的情况下，反演的地表反照率存在一定的误差，导致得到的

LST偏高，而其梯度也高于实际情况，但其反映的城市热岛特征更加显著。

(2) 尽管采用的自动气象站资料存在站点分布不规则，数据还需加强质量控制，但本研究引用的新的变分订正方法对于校正卫星资料反演的等高分辨率物理量场具有积极意义。

(3) 由于湖南省的MODIS资料数据从2005年才开始采集，所以无法进行多时次的城市热场分析对比，仅仅分析了空间分布特征，没有完成长沙城市热岛效应的时空特征分析，得出的初步结论还有待进一步的验证。

(4) 长株潭城市群是华中南地区重要的城市聚集区，随着长株潭两型社会的建设，三市融城节奏的加快，其城市生态环境越来越受到重视，研究长株潭城市群的热岛效应具有重要现实意义。受自动站站布设的限制(湘潭与株洲核心城区还未布设自动气象站)，仅仅分析了长沙城市热岛效应，而长株潭城市群将是今后湖南省城市热岛效应研究的重点。

#### 参考文献:

- [1] Howard L. Climate of London Deduced from Meteorological Observations[M]. 3rd. London: Harvey and Darton, 1833: 348.
- [2] 张佳华, 侯英雨, 李贵才, 等. 北京城市及周边热岛日变化及季节特征的卫星遥感研究与影响因子分析[J]. 中国科学D辑:地球科学, 2005, 35(增刊1): 187-194.
- [3] 王桂玲, 蒋维楣, 魏鸣. 城市热岛效应的卫星遥感分析[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(6): 298-304.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 范心圻, 刘继韩, 张彬, 等. 我国主要城市热岛现象动态监测研究[C]//徐希孺. 环境遥感与作物估产的遥感研究论文集. 北京: 北京大学出版社, 1991: 171-189.
- [7] 周红妹, 周成虎, 葛伟强, 等. 基于遥感和GIS的城市热场分布规律研究[J]. 地理学报, 2001, 56(2): 189-197.

- [8] Weng Q . Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect[J] . Photogrammetric Engineering & Remote Sensing , 2003 , 69(5) : 555-566 .
- [9] 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 .
- [10] 唐伶俐, 陈刚, 戴昌达 . 南京市热岛效应的卫星遥感[J] . 国土资源遥感, 1993(2) : 6-9 .
- [11] Parkinson C L , Greenstone R . EOS data products handbook[K] . Maryland : NASA Goddard Space Flight Center , 2000 : 163 .
- [12] 佟华, 刘辉志, 胡非, 等 . 城市规划对大气环境变化及空气质量的影响[J] . 气候与环境研究, 2003 , 8(2) : 860-87 .
- [13] 程兴宏, 徐祥德, 张胜军, 等 . 北京地区热岛非均匀分布特征的卫星遥感-地面观测综合变分分析[J] . 气候与环境研究, 2007 , 12(5) : 683-692 .
- [14] 徐祥德, 许健民, 王继志, 等 . 大气遥感再分析场构造技术与原理[M] . 北京 : 气象出版社, 2003 : 58-91 .
- [15] 柏晶瑜, 徐祥德, 刘瑞云 . 对晴空TBB资料的变分订正在青藏高原地温研究中的应用[J] . 计算物理, 2001(4) : 298-302 .
- [16] 刘珊, 颜智勇 . 湘江流域长沙段水资源问题分析[J] . 湖南农业大学学报 : 自然科学版, 2009 , 35(1) : 64-66 .
- [17] 历华, 曾永年, 贲培东, 等 . 基于MODIS数据的长株潭地区城市热岛时空分析[J] . 测绘科学, 2007 , 32(5) : 108-204 .
- [18] 历华 . 基于多源遥感数据的城市热岛研究——以长株潭地区为例[D] . 长沙 : 中南大学信息物理工程学院, 2007 : 26-28 .
- [19] 曹进, 曾光明, 石林, 等 . 基于RS和GIS的长沙城市热岛效应与TSP污染耦合关系[J] . 生态环境, 2007 , 16(1) : 12-17 .
- [20] 倪黎, 沈守云, 黄培森 . 园林绿化对降低城市热岛效应的作用[J] . 中南林业科技大学学报, 2007 , 22(7) : 73-25 .
- [21] 唐志红, 崔卫国, 文倩 . 中南丘陵区土地利用格局时空变化分析[J] . 湖南农业大学学报 : 自然科学版, 2009 , 35(2) : 204-207 .
- [22] 覃志豪, 高懋芳, 秦晓敏, 等 . 农业旱灾监测中的地表温度遥感反演方法[J] . 自然灾害学报, 2005 , 8(14) : 64-71 .
- [23] 李粉玲, 刘勇 . 基于MODIS的祁连山区路面温度反演算法比较[J] . 兰州大学学报 : 自然科学版, 2008 , 44(专辑) : 6-9 .
- [24] 毛克彪, 覃志豪, 施建成, 等 . 针对MODIS影像的劈窗算法研究[J] . 武汉大学学报, 2005 , 30(8) : 703-707 .
- [25] 吴孟泉, 崔伟宏, 李景刚 . 基于MODIS影像数据的劈窗算法研究及其参数确定[J] . 遥感技术与应用, 2005 , 20 : 284-289 .
- [26] 孙亮, 孙睿, 贾成刚, 等 . MODIS数据反演地表温度劈窗算法比较[J] . 北京师范大学学报 : 自然科学版, 2008 , 44(4) : 434-438 .
- [27] 徐敏彰 . MODIS卫星资料在反演地表温度之应用[C]//2007年台湾地球科学联合学术研讨会论文 . 台湾, 2007 .
- [28] 徐祥德, 周秀骥, 翁永辉, 等 . 星载MODIS资料与地面光度计探测气溶胶变分场[J] . 科学通报, 2003 , 8(15) : 1680-1685 .
- [29] 万齐林 . 气象遥感资料变分校准方案改进及应用试验[J] . 气象, 2006 , 32(11) : 19-24 .
- [30] 马慧, 万齐林, 陈子通, 等 . 基于Z-I关系和变分校正法改进雷达估测降水[J] . 热带气象学报, 2008 , 28(5) : 546-549 .
- [31] 沈桐立, 闵锦忠, 吴诚鸥, 等 . 有限区域卫星云图资料变分分析的试验研究[J] . 高原气象, 1996 , 15(1) : 58-67 .
- [32] 张兆明, 何国金, 肖荣波, 等 . 基于RS与GIS的北京市热岛研究[J] . 地球科学与环境学报, 2007 , 29(1) : 107-110 .
- [33] 赵永, 沙晋 . 地形因子对福州市水热空间分布影响的分析[J] . 遥感应用, 2007(6) : 68-72 .
- [34] 李成范, 刘岚 . 山地城市热岛效应的遥感研究——以重庆市北碚区为例[J] . 测绘工程, 2009 , 18(1) : 45-49 .
- [35] 颜玲 . 长沙市热岛效应遥感分析及其防治措施[J] . 工程与地质环境, 2006 , 3(3) : 155-157 .

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 胡东平