

基于 Landsat ETM + 影像的城市热岛研究

林志彬 (厦门地震勘测研究中心, 福建厦门 361021)

摘要 采用 Landsat ETM + 影像数据, 分别利用 MODTRAN 4 和 FLAASH 对热红外波段和可见光、近红外波段进行大气校正, 采用 Valor 的植被指数混合模型估算地表比辐射率, 以普朗克公式推算地表温度, 并以长沙市为研究区, 分析了不同地表覆盖类型以及 NDVI 与地表温度之间的关系。结果表明, 不同地表覆盖类型的地表温度有着显著差异, 城市地表温度与 NDVI 之间具有明显的负相关关系, 增加城市的绿地面积有助于缓解城市热岛效应。

关键词 Landsat ETM + ; 大气校正; 地表比辐射率; 地表温度

中图分类号 X16 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)28-13961-03

Study on Urban Heat Island Based On Landsat ETM + image

LIN Zhi-bin (Xiamen Center for Earthquake Prospecting and Measuring, Xiamen, Fujian 361021)

Abstract The thermal infrared band and the red and near infrared bands of Landsat ETM + data were atmospherically corrected by MODTRAN 4 and FLAASH, and land surface emissivity was calculated by combining vegetation index algorithm from Valor. The land surface temperature was retrieved based on inversion of the Planck's law. And this method was applied to Changsha city, the relationship between urban land cover and land surface temperature were studied, and the same work was done between NDVI and land surface temperature. The result showed that prominent negative correlation between land surface temperature and NDVI were found in the urban area, and the increment areas of vegetation were helpful to alleviate the urban heat island effect.

Key words Landsat ETM + ; Atmospheric correction; Land surface emissivity; Land surface temperature

地表温度是地-气系统相互作用过程的一个重要物理参数, 它综合反映了地气能量与物质交换的结果, 在天气预报、灾害监测、城市环境等研究领域得到了广泛的应用^[1-4]。由于影响地表温度的表面状态参数, 如反照率、表面湿度、土壤的物理和热特性以及植被分布等具有较强的空间非均匀性, 因而地表温度在空间的变化较大, 所以常规的地面定点观测难以满足大范围地表温度信息的获取。而热红外遥感可以快速、便捷的获取大范围的地表温度面状信息, 因此利用热红外遥感数据反演地面温度得到了广泛的应用。

自从 20 世纪 60 年代初期发射 TIROS - III 以来, 学者们就利用卫星遥感数据反演地表温度。国内外不少学者利用 NOAA/AVHRR 或 LANDSAT TM/ETM + 热红外影像对城市热场进行研究, 周红妹通过对多时相 NOAA 气象卫星数据的分析, 研究了上海市区的热岛动态变化特征^[2]; 陈云浩等利用 TM6 数据得出上海市的城市亮温分布场, 对其热力景观、细部结构及成因作了分析^[3]; Weng 运用遥感和 GIS 相结合的方法研究了广州和珠江三角洲地区的城市地表温度分布格局及其与土地利用变化之间的关系^[4]。地表温度反演中的一个主要难题就是大气校正, 而大气校正最大的难点在于难以获取与遥感数据同步的一系列大气参数, 为此许多学者提出利用分裂窗算法反演地表温度, 通过两个通道测量值的各种组合来剔除大气的影响。分裂窗法在海面温度 (SST) 反演中较为成功, 其反演误差可小于 0.7 °C, 在全球范围内精度可达 1 K。目前, 运用分裂窗算法反演地温的数据源主要有 NOAA 气象卫星 AVHRR 的第四通道 (10.5 ~ 11.3 μm)、第五通道 (11.5 ~ 12.5 μm) 和 MODIS 的 31 (10.78 ~ 11.28 μm)、32 (11.77 ~ 12.27 μm) 通道, 空间分辨率分别为 1.11 km 和 1.00 km, 对于城市尺度的热环境研究来说, 这样的分辨率显得过于粗糙, 而 Landsat ETM + 影像热红外通道

的空间分辨率为 60 m, 可以用来描述城市热环境的细部信息及城市地区的热岛效应, 故笔者采用 ETM + 数据反演城市地表温度, 由于 ETM + 只有一个热红外通道, 只能采用单通道算法反演地表温度, 故该文采用大气辐射传输模型 MODTRAN 4 进行大气校正, 然后通过普朗克方程推算地表真实温度。

1 研究区域与数据资料

选取长沙市为研究区域。长沙位于中国东南部, 湖南省东部偏北, 湘江下游和长浏盆地西缘, 地域范围为 115°53' ~ 114°15'E, 27°51' ~ 28°41'N。长沙属亚热带季风气候, 由于位居盆地内部, 距海较远, 受冬夏季风转换, 地势向北倾斜等因素的影响, 冬冷夏热, 季节变化明显。全市土地面积 11 819.5 km², 其中城区面积 556 km², 1999 年底人口总数 582.47 万。研究所采用的数据是轨道号为 123/41 的 2001 年 12 月 29 号 ETM + 影像, 卫星过境时间为 10:30 左右, 图像质量较好、清晰无云。

2 数据处理

2.1 几何校正 以长沙市 1:2 000 地形图为基准, 采用二次多项式拟合校正法对 2001 年 12 月 29 日影像进行几何精校正, 经检验, 几何校正误差 (RMS) 在半个像元范围以内, 符合精度要求; 根据长沙市行政边界矢量图, 提取出研究区域。

2.2 大气校正 在计算植被覆盖度时采用三波段梯度差法, 需要 ETM + 近红外、红、绿 3 个波段的地表反射率, 故首先采用 ENVI 4.2 的大气校正模块 FLAASH 对 Landsat ETM + 的可见光和近红外波段进行大气校正, 得到 3 个波段的地表反射率, 然后计算植被覆盖度。

2.3 土地利用/覆盖分类 为了更好地了解各种地表覆盖类型和地表温度之间的关系, 对研究区影像进行土地利用/覆盖分类。在参考了中国科学院的中国土地资源分类系统和长沙市 2004 年土地利用/覆盖三级分类系统的基础上, 将研究区的土地利用/覆盖划分为城市或建设用地、水体、耕地、林地和沙地 5 种类型。采用监督分类的最大似然法进行

作者简介 林志彬 (1981 -), 男, 福建龙海人, 在读硕士, 助理工程师, 从事城市遥感和 3S 集成研究。

收稿日期 2009-08-03

分类,对所选特征进行统计和图像分析,结果表明,ETM + 4、3、2 的假彩色合成是识别种类最有效的,因此用来进行分类。通过与现有的土地利用/覆盖图和长沙市 2.5 m 高分辨率影像进行比较以及实地验证来确定分类的精度,最后分类的精度为 82.08%,Kappa 系数为 0.764(图 1)。

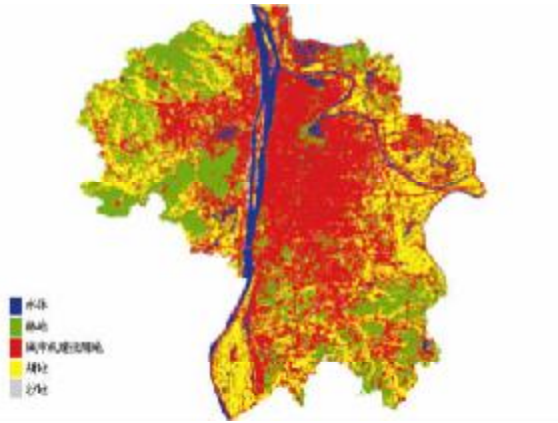


图 1 研究区土地利用/覆盖分类
Fig.1 Land use/cover map of study area

3 地表温度反演

3.1 大气校正 根据热辐射传输理论,卫星传感器接收到的辐射亮度 L_λ 主要有地面发射的热辐射、大气向上发射的热辐射及大气向下的热辐射经地面反射后又被传感器所接收的热辐射 3 部分组成^[5]。

$$L_\lambda = \varepsilon_\lambda L_\lambda(T_s) \times \tau + (1 - \varepsilon_\lambda) L_{\lambda atm} \downarrow + L_{\lambda atm} \uparrow \quad (1)$$

其中, T_s 为地表真实温度, $L_\lambda(T_s)$ 表示温度为 T_s 的黑体在热红外波段的辐射亮度, $L_{\lambda atm} \downarrow$ 表示大气下行辐射亮度, $L_{\lambda atm} \uparrow$ 表示大气上行辐射亮度, ε_λ 为地表比辐射率, τ 为大气在热红外波段的透射率。

计算地表温度时需要的只是(1)式中的第 1 部分,故笔者采用大气辐射传输模型 MODTRAN 4 进行大气校正。由于研究区位于中纬度地区,并且影像获取时间为 12 月份,故采用中纬度冬季标准大气模式,由 MODTRAN 4 进行模拟,获取研究区热红外波段的大气透射率、大气上行辐射和下行辐射,并根据实际情况将透射率结果做了相应调整,最终模拟的结果分别是 0.815、1.13、1.06 W/(m²·sr·μm)。

3.2 比辐射率计算 地表比辐射率是地表温度反演中的关键性参数之一,对地表温度的计算有重要影响,然而由于 Landsat ETM + 只有一个热红外通道,无法直接获取比辐射率,故选取典型的 Valor 的植被指数混合模型算法^[6],公式如下:

$$\varepsilon = f\varepsilon_v + (1 - f)\varepsilon_s + d\varepsilon \quad (2)$$

其中, ε_v 为完全植被覆盖的比辐射率(取 0.986), ε_s 为裸露土壤的比辐射率(取 0.970), f 为植被覆盖度, $d\varepsilon$ 表示地表几何分布和内部散射效应,可以近似表示为:

$$d\varepsilon = (1 - \varepsilon_s)(1 - F)\varepsilon_v \quad (3)$$

其中, F 为地形因子,可根据不同的几何分布取值,其均值为 0.55。

该文在计算植被覆盖度 f 时采用一种简单的估算方法—三波段梯度差法。唐世浩等根据上述植被和土壤的光谱特点,提出如下形式三波段梯度差植被指数^[7](TGDVI):

$$TGDVI = \frac{R_{ir} - R_r}{\lambda_{ir} - \lambda_r} - \frac{R_r - R_g}{\lambda_r - \lambda_g} \quad (4)$$

若 $TGDVI < 0$, 则取 $TGDVI = 0$

其中, R_{ir} 、 R_r 和 R_g 分别为近红外、红、绿波段的反射率; λ_{ir} 、 λ_r 和 λ_g 为相应波段的波长中值。分析该植被指数可以看出,随植被增加,绿光和近红外反射率增加,红光反射率减小,该植被指数增大;反之,该指数减小。对于植被来说, TGDVI 一般不会小于 0。

利用 TGDVI 计算植被覆盖度 f 的公式如下:

$$f = TGDVI / TGDVI_{max} \quad (5)$$

其中, $TGDVI_{max}$ 为最大三波段梯度差。

3.3 地表温度反演 根据 Landsat ETM + 影像数据头文件中的定标信息对研究区热红外数据进行辐射定标,获取 Landsat ETM + 热红外波段的表观辐射亮度 L 。根据得到的热红外波段表观辐射亮度 L ,利用(1)式和 MODTRAN 4 模拟的大气参数计算辐射亮度 $L_\lambda(T_s)$,然后根据普朗克公式的逆运算求出地表温度,简化公式如下^[8]:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (6)$$

其中, L_λ 为由 T_s 决定的辐射亮度, K_1 、 K_2 为预设的标定常数。对于 Landsat ETM +, $K_2 = 1282.71$ K, $K_1 = 666.09$ W/(m²·Sr·μm)。

4 结果分析

2001 年 12 月 29 日温度分布图的统计数据表明当天最低温度是 5.91 °C,最高温度是 16.19 °C,分别为水体和城市或建设用地的温度。从图 2 可以明显看出,城市地区有一个相对较高的温度,由市中心向外呈现地表温度逐渐降低的趋势。大部分的高温区都出现在城市中心,主要包括天心区的北部、雨花区的西北部、芙蓉区的西部、开福区的南部和岳麓区的东部,这里主要分布着长沙的工业区、商业区和居民区;另外有一个很明显的高温区出现在天心区的南部,这里是长沙市大托机场。而城市周围的温度普遍较低,这里遍布着树木和农田,这些地表有利于降低城市热岛效应。

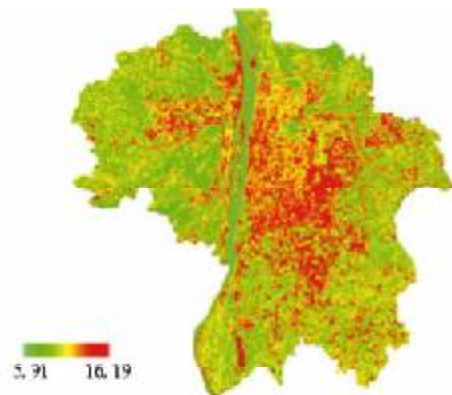


图 2 2001 年 12 月 29 日研究区地表温度分布
Fig.2 LST map of study area on 29th, Dec 2001

为了对比城区和郊区地表温度差异分别在城区和郊区选取一个样区,根据地表温度反演结果,绘制出长沙市城区和郊区地表温度频率分布图。从图 3 中可以看出,城区地表温度比较集中,主要分布在 10 ~ 16 °C,平均温度是 14.10 °C;

郊区地表温度较低,主要分布在 6~12℃,平均温度是 10.50℃。从平均温度来看,城区比郊区高出 3.6℃,说明城市热岛效应比较明显。

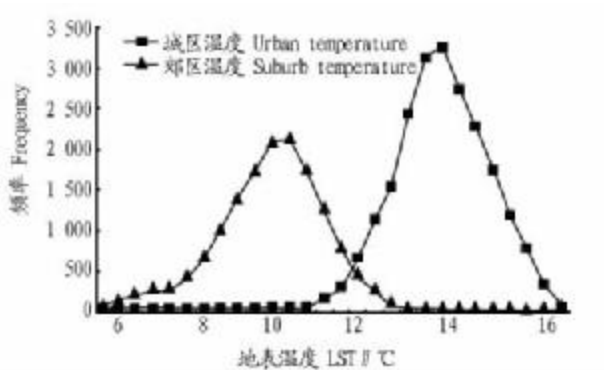


图3 城区和郊区地表温度频率分布关系

Fig. 3 The relationship between frequency distribution of LST in urban and suburb

为了更好地了解不同土地利用/覆盖类型和地表温度之间的关系,把地表温度分布图叠加到土地利用/覆盖分类图上。由表1可知,城市或建设用地显示了最高的平均地表温度,接下来的是沙地。城市或建设用地之所以有最高的平均温度是因为城区建筑高大密集,不利于空气流通,同时砖瓦水泥等建筑材料的热容量和热惯量小,但热传导率和热扩散率大,在接受太阳辐射后很快向周围的大气扩散,导致周围温度比有植被覆盖的地区要高。而沙子由于比热容量小,被太阳光照射后,温度迅速升高,在热红外波段上呈高反射率,故地表温度也较高。最低的地表温度是水体,这主要是由于水的热传导较强,水面不宜积聚热量而使表面温度相对较低。温度位于中间的是林地和耕地。林地覆盖着密集的植被,可以通过蒸腾作用减少储存在土壤和表层结构中的热量,因此温度也较低。耕地的温度位于中间是因为含有少量的植被和裸土。

表1 土地覆盖类型的地表温度

Table 1 LST of different land cover types °C

土地覆盖类型	最高温度	最低温度	平均温度
Land cover types	Highest temperature	Lowest temperature	Average temperature
城市或建设用地	16.19	10.59	14.20
City or construction land use			
沙地 Sand land	15.37	9.88	13.59
耕地 Cultivated land	14.13	9.07	10.62
林地 Forest land	12.85	8.24	9.61
水体 Water	8.93	5.91	7.87

从上面的分析中可以看出,地表温度与地表覆盖类型有着密切的关系。考虑到 NDVI 能在很大程度上表征下垫面的特征,为了能够定量分析地表温度与 NDVI 之间的关系,作出这两者之间的散点图。从图4可知,地表温度和 NDVI 之间存在显著负相关,相关系数达到 0.683,当 NDVI 增加时,植被覆盖度增大,地表温度会降低。这表明植被在分配潜热和显热通量比例时起到重要的作用,也就是绿色植物的降温效果明显,增加城市的绿地面积,并提高绿地的植被覆

盖度,将有助于缓解城市热岛效应。

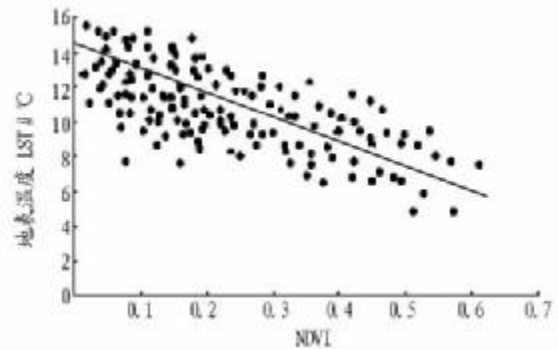


图4 研究区地表温度和 NDVI 之间的散点图

Fig. 4 Scatter plot between LST and NDVI in study area

5 结论与展望

(1) 该文利用 MODTRAN 4 模拟大气上、下行辐射和大气透射率,对 ETM + 热红外波段进行大气校正;采用 ENVI 4.2 的大气校正模块 FLAASH 对可见光和近红外波段进行大气校正,获取近红外、红、绿三波段的地表反射率,通过三波段梯度差法计算植被覆盖度,进而利用 Valor 的植被指数混合模型估算地表比辐射率;最后根据普朗克方程推算长沙市地表温度,并对各种土地利用/覆盖类型的地表温度进行了分析,结果表明地表温度反演结果比较合理。

(2) 地表温度反演的结果主要取决于大气状态参数和比辐射率的精度然而在利用 MODTRAN 4 模拟大气参数时,由于没有卫星过境时的同步气象数据,无法对地表温度反演结果进行客观的评价,同时也没有实测比辐射率数据进行验证,所以,该文研究方法所求的地表温度的精度控制有待进一步研究与完善。

(3) 由于卫星过境时的同步气象数据难以获取,而在北半球 Landsat 和 Terra 都是上午,同一天上午 TM/ETM + 数据和 MODIS 数据在不同的地方获取时间大约会有 0.5~2 个小时的差别,由于 MODIS 数据有数个大气参数探测波段,在今后的研究中可以考虑用 MODIS 数据反演的大气参数对 TM/ETM + 数据进行大气校正,这样在用 TM/ETM + 数据反演城市地表温度是可以得到更好的精度,另外还可以考虑 TM/ETM + 热红外波段和 MODIS 热红外波段的融合。

参考文献

- [1] 覃志豪,高懋芳,秦晓敏,等. 农业灾害监测中的地表温度遥感反演方法——以 MODIS 数据为例[J]. 自然灾害学报,2005,14(4):64-71.
- [2] 周红妹. NOAA 卫星在上海市热力场动态监测中的应用[J]. 大气科学与应用,1998(1):23-28.
- [3] 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,2002,54(4):55-59.
- [4] WENG QIHAO. A Remote Sensing-GIS evaluation of urban expansion and its Impact on surface temperature in Zhujiang Delta, China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001,22(10):1999-2014.
- [5] 陈良富,庄家礼,徐希孺. 热红外遥感中通道间相关性及其对地面温度反演的影响[J]. 科学通报,1999,44(19):21-27.
- [6] VALOR E, CASELLES V. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas[J]. Remote Sensing of Environment, 1996,57:167-184.
- [7] 唐世浩,朱启疆,周宇宇,等. 一种简单的估算植被覆盖度和恢复背景信息的方法[J]. 中国图象图形学报,2003,8A(11):1304-1308.
- [8] SCHNEIDER K, MAUSER W. Processing and accuracy of landsat thematic mapper data for lake surface temperature measurement[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(11):2027-2041.