

张掖绿洲城市热效应的遥感研究

刘三超, 张万昌

(南京大学国际地球系统科学研究所,南京 210093)

摘要：以张掖及周边绿洲为研究区,采用 Gilabert 大气校正模型对 TM 图像 1~5,7 等 6 个波段进行大气校正。在此基础上,采用基于 TM6 波段的单窗算法,反演出行星亮度温度和地表真实温度,进一步分析了区域热量分布差异并探讨这一差异形成原因。结果表明：张掖及周边绿洲区存在明显的热量分布差异,热岛现象非常显著,卫星图像反演的地表温度接近实测值,亮度温度和实际温度都与归一化植被指数 (NDVI) 存在着密切的反相关关系,表明植被在区域热量分布差异中起重要作用,显示出热红外图像与其它波段数据结合,在城市热岛效应及区域生态环境遥感研究方面有很大潜力。

关键词：单窗算法；亮度温度；地表温度；热岛效应

中图分类号：TP 79 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-070X(2003)04-0017-05

0 引言

城市化和城市扩张是全球面临的重大问题。由于地表覆盖和土地利用伴随城市化进程发生巨大变化,引起城市及周边地区地表-大气系统能量状况的变化,产生诸如‘热岛效应’等众多负面影响。

遥感技术克服了传统点源地表观测的局限性,可提供一定时空精度的面状地表信息,因此,在城市研究中有远大前景。但迄今为止,城市遥感大多限于地表覆盖的动态变化研究,而很少从能量平衡的角度着手。造成这种状况的原因主要是由于热红外图像的大气校正非常困难,如果采用多波段 NOAA-AVHRR 热红外图像的劈窗算法,虽可减小大气影响^[1],但 NOAA 图像的空间分辨率太低(其星下点空间分辨率为 1.1 km),尽管用于下垫面相对均一的海洋表面温度反演比较成功,但在陆地温度精确反演方面却存在较大局限^[2]。

用单波段 TM6 图像反演陆地表面温度,一般只能求出亮度温度,而很少能得到地表真实温度。Hurtato 提出了用 TM6 波段数据反演地表温度的方法^[3],但该算法复杂且某些参数获取困难,从而降低了它的实用性。最近,覃志豪提出单窗算法^[4~6],该算法使用 TM6 数据反演地表实际温度成为可能。

1 研究区概况

研究区位于我国西北黑河流域中游的张掖市及周边绿洲区。该区年平均气温为 7℃,年均降水量 140 mm 左右,为典型的干旱、半干旱生态类型区。该区为我国西北重要农业区,也是国家西部生态建设的重点地区。由于降水稀少,人类活动对脆弱的生态系统影响越来越大,因此,研究这一地区城市热效应,对进一步理解我国西北干旱、半干旱区的土壤-植被-大气系统能量交换状况及区域热量分布差异有着重要意义。

2 信息源选择

本文使用的遥感图像是 1991 年 7 月 9 日成像的 Landsat-5 TM 图像,其中 TM6 波段空间分辨率为 120 m,其它 6 个波段空间分辨率为 30 m。选取实地测量的 12 个地面控制点,对影像进行了精确几何校正,最大误差小于 0.5 个像元。相关资料主要包括‘中日合作黑河地区地-气相互作用野外观测试验研究 (HEIFE)’资料^[7]、当地气象资料以及 1991 年夏季观测数据。

3 原理和方法

3.1 图像预处理和 NDVI 计算

图像预处理主要指对 TM1 ~ TM5, TM7 等 6 个波段进行大气校正。由于研究区地形起伏不大,因此对图像不进行地形校正,而直接采用 Gilabert 提出的方法进行大气校正^[8],具体方法参见文献^[9]。

NDVI 是广泛应用的一种表征地表植被覆盖状况的植被指数,计算公式如下

$$NDVI = (R_{s4} - R_{s3}) / (R_{s4} + R_{s3}) \quad (1)$$

式中, R_{s4} 、 R_{s3} 分别代表大气校正后的 TM4、TM3 波段反射率。

3.2 地表温度反演

用 TM6 数据反演地表温度,需首先求出行星亮度温度,然后可用单窗算法计算出地表实际温度。亮度温度计算可分两步^[10]:

首先,把原始图像的灰度值(DN 值)转化成相应的热辐射强度值;然后,根据热辐射强度推算出相应的行星亮度温度。

陆地卫星发射前,已进行了定标,根据 Markham 等研究^[11],传感器辐射强度和影像 DN 值间存在以下关系

$$R_{\lambda} = 0.1238 + 0.0056332DN \quad (2)$$

式中, R_{λ} 为 TM6 传感器接收的辐射强度(单位为 $mWcm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)。用上式求出热辐射强度后,亮度温度可直接用普朗克方程反推,也可用下面的反推公式近似计算行星亮度温度^[10,11]

$$T_b = K_2 / \ln(K_1 / R_{\lambda} + 1) \quad (3)$$

式中, T_b 为没有经过大气校正的行星亮度温度; K_1 、 K_2 为预设量。对于 Landsat 5 热红外图像, $K_1 = 60.776 mWcm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$, $K_2 = 1260.56 K$ ^[10,12]。

由于大气辐射和地表热特性影响,行星亮度温度与实际地表温度之间存在较大差异,在天气干燥晴朗条件下,这一差距也可达 $5^{\circ}C$ 左右^[12]。因此,要得到精度较高的地表温度,必须在行星亮度温度基础上进一步推求地表真实温度。过去用 TM6 图像反演地表真实温度主要采用大气校正法,这种方法原理复杂且实时大气剖面资料很难获取,而如果用标准大气剖面数据代替实时大气剖面资料又会导致计算结果产生较大误差。

覃志豪提出了一种根据地表热辐射传导方程而不需要大气校正直接反演地表温度的单窗算法^[4~6],算法假定在天空晴朗且没有明显大气垂直

涡流作用情况下,可把大气分成几个平行层面,如果缺乏实地的大气剖面资料,仍可把标准大气数据和当地实时地面气象资料(主要是气温和大气含水量)结合起来。如果计算出地表比辐射率 ε 、大气等效温度 T_a 和大气透射率 τ 等 3 个参数,则可用下面算式从行星亮度温度来推算地表实际温度^[4~6]。

$$T_s = \{ \varepsilon(1 - C - D) + [(b - 1)(1 - C - D) + 1]T_b - DT_a \} / C \quad (4)$$

式中, T_s 是地表实际温度; T_b 为行星亮度温度; T_a 为大气等效温度; a 和 b 是参考系数(当地表温度为 $0 \sim 70^{\circ}C$ 间时, $a = -67.355351$, $b = 0.458606$); C 和 D 是中间变量,可用下面两式求得

$$C = \varepsilon \cdot \tau \quad (5)$$

$$D = (1 - \tau)[1 + (1 - \varepsilon)\tau] \quad (6)$$

式中, ε 为地表比辐射率; τ 为大气透射率。

3.2.1 地表比辐射率

NDVI 和地表比辐射率间有一定的经验关系^[13,14],但这些经验关系仅在 NDVI 处于 $0.1 \sim 0.74$ 区间范围内适用。实际上,研究区 NDVI 数值实际变化范围可到 $-0.3 \sim 0.8$ 。通过区域特性差异修正,发现当 $NDVI < 0.1$ 时,可以采用波段反射率比值 $SR(R_{s4}/R_{s3})$ 计算地表比辐射率;当 $NDVI \geq 0.1$ 时,仍然沿用 Gried 提出的经验关系式^[13],即

$$\varepsilon = 1.0678 + 0.027 \ln SR \quad \text{当 } NDVI < 0.1 \quad (7)$$

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.074 \ln NDVI \quad \text{当 } NDVI \geq 0.1 \quad (8)$$

3.2.2 大气等效温度和大气透射率

单窗算法认为,大气等效温度主要取决于大气剖面的气温分布和大气水分状况,而大气透射率则主要取决于大气水分含量。由于研究区位于中纬度且影像成像时间为 7 月,因此,采用中纬度夏季高气温标准大气剖面参数的关系来计算这两个参数^[6]

$$T_a = 16.0110 + 0.92621T_0 \quad (9)$$

$$\tau = 0.97429 - 0.08007w \quad (10)$$

式中, T_0 为地表附近气温; w 为大气水分含量。这两个参数可从当地气象资料获得。

至此,通过遥感图像计算的行星亮度温度、比辐射率以及结合地面气象数据得到的大气等效温度和大气透射率,即可求出地表实际温度。

4 结果和分析

4.1 温度反演结果

地表温度反演结果的验证是很困难的,研究中

收集了卫星过境时的气象资料以及 HEIFE 试验比较齐全的地表温度和土壤表层温度资料,同时 1991 年夏季在黑河流域进行了野外观测,其中一项是利用日本产手持式热红外辐射仪测量地表温度。每个观测点取 3 个剖面,每个剖面大概 50 m 长,剖面间横向大概相隔 10 m 左右,测量结果取 3 条剖面的均值。张掖,临泽和高崖的地表实测资料与卫星过境时间的基本同时测量。实测资料和用 TM6 图像反演的亮度温度和真实温度对比结果如表 1 所示。

表 1 遥感反演的亮度温度及地表温度和实测值对比

地点	地表类型	实测值/℃	估测值/℃	
			亮度温度	地表温度
张掖	绿洲	25.1	22.8	23.5
临泽	绿洲	26.5	22.3	25.1
莺落峡	灌木	28.5	26.1	29.5
高崖	裸地	30.7	27.2	31.5

覃志豪对单窗算法的精度和参数敏感性进行了较详细分析^[4~6],并对埃及和以色列交界的沙漠区进行研究,指出单窗算法所推算的地表温度比行星亮度温度更接近实测地表温度。从表 1 可看出,单

窗算法反演的地表真实温度与实测数据之间的误差大概可以控制在 1.5℃ 左右,而简单辐射定标得到的亮度温度大概与地表实测温度相差 3~5℃,这初步验证了单窗算法精度。

值得指出的是,Price 认为^[15],行星亮度温度和地表黑体亮度温度间具有一定的线性关系(在地表黑体亮度温度基础上进行地表比辐射率校正,也可得到地表真实温度)。而本文研究区范围相对较小,且由于资料的限制, T_0 和 w 两个参数在整个研究区仅赋予一个值,而在空间上没有进行内插,且单窗算法在地表温度较高时对地表比辐射率不太敏感,导致了反演的行星亮度温度和地表真实温度之间有良好的线性关系,这与单窗算法结论也是一致的。

4.2 张掖市和周围绿洲区的热量差异及原因

研究区主要位于张掖市及周边绿洲农作物种植区,其中,张掖市和上秦镇为研究区内主要城市和居民区,由于绿地和植被覆盖少,图像中相应的 NDVI 值也很低,其它地方农作物和人工林等植被覆盖较多,对应的 NDVI 值也比较高。地表真实温度反演结果如图 1 所示。

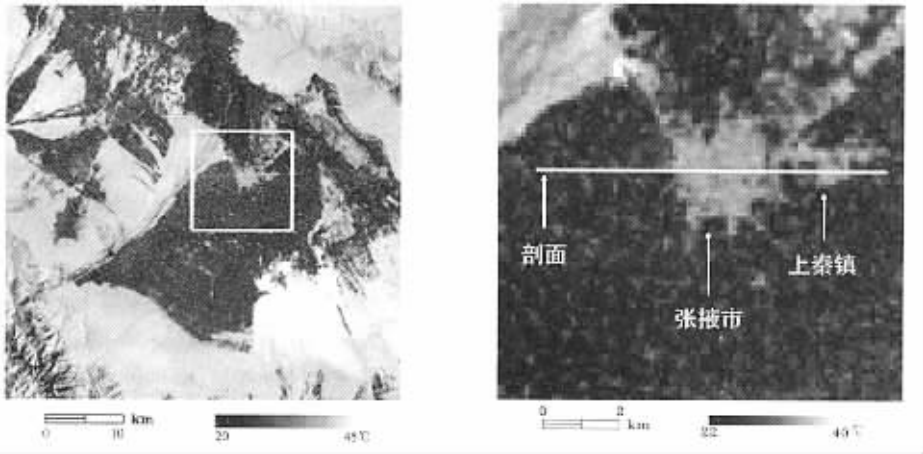


图 1 张掖附近地表温度图(左图为整个研究区,右图为左图白框部分放大图)

为便于了解 NDVI 与反演亮度温度与地面温度间的空间关系,把 NDVI 图像重采样为 120 × 120 m, 以与温度图像空间大小一致,并在图像上取一条横贯张掖市区和上秦镇的剖面。图中箭头所指灰白色亮区分别为张掖市和上秦镇,两者之间还有一个较窄的绿化带,其它地区主要为夹杂分散居民点的农作区。沿剖面 NDVI 与亮度温度和真实温度间的关系分别如图 2 和图 3 所示。

从图 2 图 3 可以看出,张掖市和上秦镇两个植被覆盖稀少的地区 NDVI 很小,亮度温度却达到 36℃ 左右,真实温度达 39℃ 左右,而在 NDVI 较大植

被覆盖比较多的农作区,对应的亮度温度和真实温度分别只有 22℃ 和 25℃ 左右。也就是说,温度和 NDVI 之间的反相关关系非常显著。经过回归分析,亮度温度(T_b)、地表温度(T_s)和 NDVI 分别具有如下关系,且地表温度和 NDVI 间相关性更高。

$$T_b = 38.058 - 24.136 NDVI \quad (R = -0.895\ 52)$$

(11)

$$T_s = 43.364 - 27.168 NDVI \quad (R = -0.927\ 88)$$

(12)

从前面的分析可看出,地表下垫面不同,使得地表热量空间分布产生很大差异。HEIFE 试验对黑河

流域的地表热通量进行了近 2 a 的观测^[7],结果表明,在黑河流域绿洲区,植被蒸(散)发消耗的潜热通量在地表能量中占主导地位^[16]。张掖市区植被稀少,地表蒸(散)发相对绿洲区要小得多,因此,城市地区的地表温度明显高于绿洲区。HEIFI 试验从实地观测上表明了对河西走廊地区下垫面对地表能量分布的决定性影响,地表热通量的遥感研究也证实了这种结果^[17]。本文也表明,在张掖绿洲这种典型的干旱半干旱生态脆弱区,城市扩张将会产生非常显著的热岛效应。

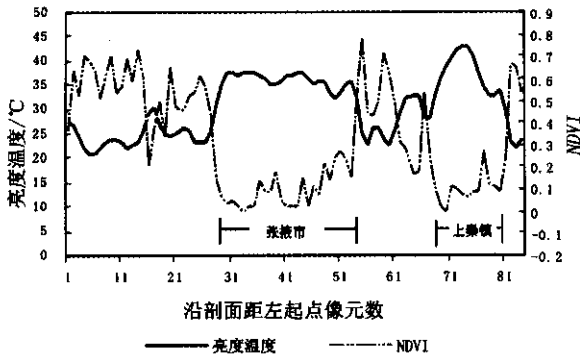


图2 张掖市及绿洲区亮度温度和 NDVI 关系图

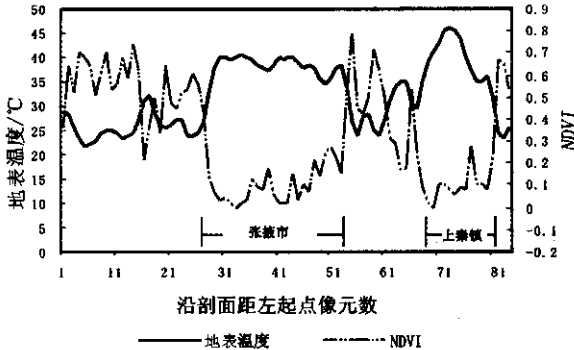


图3 张掖市及绿洲区地表温度和 NDVI 关系图

5 总结和讨论

(1) 单窗算法反演的地表温度比亮度温度更接近地表真实温度。可初步认为,单窗算法反演地表温度是可行的。

(2) 遥感图像和气象数据的预处理非常重要,如果研究区较大而且地形起伏强烈,应该进行地形校正^[8],并且最好对气象数据进行空间内插。

(3) 亮度温度和地表温度与 NDVI 有良好反相关关系,且地表温度和 NDVI 间的相关系数更高。

(4) 张掖市及周围绿洲这一典型的干旱半干旱区,城市热岛效应非常显著,下垫面的不同造成了地表热量分布的差异,植被蒸散发对地表热量空间分

布起决定性作用。

本文由于资料限制,对单窗算法反演地表温度的验证还只是初步的,对城市热岛效应的研究也仅限于张掖市和周围绿洲区。值得指出的是,虽然 Landsat 图像空间分辨率较高,但时间分辨率相对较低,随着更多高空间、时间分辨率和更多波段传感器的出现,可利用多源图像(如 NOAA、Landsat7 ETM⁺、ASTER、MODIS)并结合更多地面实测站点资料研究区域城市热岛效应。

致谢: 研究过程中得到王介民、覃志豪、蒋建军老师的大力帮助,特此感谢!

参考文献

- [1] 覃志豪, Zhang Minghua, Karnieli A. 用 NOAA - AVHRR 热通道数据演算地表温度的劈窗算法[J]. 国土资源遥感, 2001, (2) 33 - 42.
- [2] Price J C. Land Surface Temperature Measurements from the Split Window Channels of the NOAA 7/AVHRR [J]. Journal of Geographical Research, 1984, 89 :7231 - 7237.
- [3] Hurtado E, Vidal A, Caselles V. Comparison of Two Atmospheric Correction Methods for Landsat TM Thermal Band [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17 :237 - 247.
- [4] 覃志豪, 张明华, 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001, 56 (4) 456 - 465.
- [5] Qin Z, Karnieli A, Berliner P. A Mono - window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM Data and Its Application to the Israel - Egypt Border Region [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22 (18) 3719 - 3746.
- [6] 覃志豪, Li Wenjuan, Zhang Minghua, et al. 单窗算法的大气参数估计方法[J]. 国土资源遥感, 2003, (2) 37 - 43.
- [7] Yasushi M. Sino - Japanese Joint Research Project HEIFI : General Review and Results [J]. Journal of Natural Disaster Science, 2000, 22 (1) 45 - 51.
- [8] Gilabert M A, Conese C, Maselli F. An Atmospheric Correction Method for the Automatic Retrieval of Surface Reflectance from TM Images [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15 (10) 2065 - 2086.
- [9] 刘三超, 张万昌, 蒋建军等. 用 TM 影像和 DEM 获取黑河流域地表反射率和反照度[J]. 地理科学, (已接收).
- [10] Wuklic G E, Gibbons D E, Martucci M. Radiometric Calibration of Landsat Thematic Mapper Thermal band [J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 28 :339 - 347.
- [11] Markham B L, Barker J L. Landsat MSS and TM post - calibration Dynamics Ranges, Exoatmospheric Reflectances and at - satellite Temperature [J]. EOSAT Landsat Tech. Notes, 1986, 1 :3 - 8.
- [12] Sugita M, Brusaert W. Comparison of Land Surface Temperatures Derived from Satellite Observation with Ground Truth During FIFE [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14 (9) : 1659 - 1676.

[13] Gried V D, OWE M. On the Relationship Between Thermal Emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index for Natural Surface[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14 (6) : 1119 - 1131.

[14] 刘东琦,王介民. 利用 ATSR/ERS - 1 资料研究复杂下垫面壁辐射率的变化[J]. 大气科学, 1999, 23 (5) 613 - 622.

[15] Price J C. Estimating Surface Temperatures from Satellite Thermal

Infrared data - a Simple Formulation for the Atmospheric Effect [J]. Remote Sensing of Environment, 1983, 13 353 - 361.

[16] Wang J M, Mitsuta Y. An Observation Study of Turbulent Structure and Transfer Characteristics in Heihe Oasis [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 1992, 70 (2) 1147 - 1154.

[17] 马耀明,王介民. 卫星遥感结合地表观测估测非均匀地表区域能量通量[J]. 气象学报, 1999, 57 (2) 180 - 189.

A REMOTE SENSING STUDY OF THE URBAN THERMAL EFFECT ON ZHANGYE AND ITS SURROUNDING OASIS AREA

LIU San - chao, ZHANG Wan - chang
(International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Landsat TM data have been widely utilized in resource and environment studies. Nevertheless, reports on researches combining thermal infrared band (TM6) with the other TM bands data for investigating various land surface processes remain limited in literature. In this paper, an algorithm was proposed and tested for a target area in Zhangye and its surrounding oasis areas. This study combines the TM6 for deriving planetary brightness temperature (PBT) and land surface temperature (LST) by using mono - window algorithm with the other TM bands data so as to provide several essential parameters required by the mono - window algorithm. In this algorithm, TM1 - 5 and 7 were atmospherically corrected by means of Gilabert 's method to obtain several important parameters, and then PBT and LST were calculated by means of mono - window algorithm using TM6 band. The derived LST compared with the field observations of several principal land use/cover categories suggests good applicability of the algorithm. Spatial distribution of LST and PBT was analyzed with NDVI distributions in the target area, and the strong negative correlations between LST, PBT and NDVI suggest that vegetation is a key factor controlling the spatial pattern of land surface heat flux. All this implies a great potential of thermal and optical remote sensing for urban thermal effect and urbanization studies.

Key words: Mono - window algorithm ; Brightness temperature ; Land surface temperature ; Urban heat island effect

第一作者简介:刘三超(1979 -),男,南京大学城资系硕士,从事地表参数遥感反演和水文水资源研究。
(责任编辑:刁淑娟)

=====

(上接第 12 页)

AMTIS can obtain the simultaneous multi - angle and high - resolution data. Using the AMTIS data based on the three - dimensional radiative transfer model, an inversion experiment on a wheat field in Shunyi was carried out on the basis of the AMTIS multi - angle data and the prior information. And the result was verified with the measured LAI data. The inversion precision and rate were improved by adjusting the soil classification and the matching table. The main errors in the process of inversion are also analyzed in this paper.

Key words: Leaf area index (LAI) ; Multi - angle ; Radiation transfer

第一作者简介:周宇宇(1979 -),男,2001年毕业于北京师范大学资源与环境科学系,现就读于北京师范大学遥感中心硕士研究生,主要研究方向为遥感与地理信息系统。
(责任编辑:刁淑娟)