

# 气象卫星观测资料的分析在城市区域气象环境研究中的应用

周志恩<sup>1</sup> 蒋维楣<sup>1,2</sup> 胡非<sup>3</sup> 奚文<sup>2</sup>

(1 南京大学大气科学系, 南京 210093)

(2 北京市气象局, 北京 100089)

(3 LAPC, 中科院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘 要** 目前,我国气象部门相当普遍地拥有气象卫星观测资料,但是,这些资料如何在城市气象服务以及为城市建设规划等方面的决策研究中发挥作用,急待进一步研究并开展工作。本文试图通过合理的反演处理,给出卫星观测对地面温度的测量结果,由此可比较细致地分析了解地面热状况及其与土地利用类型,地面覆盖性质等的关系。本文利用有限的 NOAA-AVHRR 气象卫星遥感资料,采用修正的 Ulivieri 分裂窗方法反演出同期的地表温度场,通过对北京地区的卫星观测资料进行算例分析,揭示出一个 200 km×200 km 范围内的地面温度分布特征。反演结果可以明显地揭示出城市热岛现象的变化规律,并且能较为清楚地反映出相对的高温区和低温区。

**关键词** 城市热岛效应 地表温度 气象卫星资料反演 归一化植被指数

**分类号** P407 **文献标识码** A

## 引 言

以往研究地表温度变化,常规方法是使用地面气象站点的观测资料,但由于空间分布的不均匀和观测所受到的种种限制,比较难于推算分析实际的地表温度变化情况。应用卫星遥感反演技术则可以一定程度的弥补这一不足。目前定量反演地表温度的方法主要分为两大类,即实验方法和计算方法。实验方法是在实际工作中利用地面定标,实测出在传感器过顶时的地表温度,建立起图像灰度值和地面辐射能量值之间的回归方程,进而求出地表温度图像<sup>[1]</sup>。理论方法则是通过求解辐射传输方程,消除大气影响,求出地表温度<sup>[2]</sup>,具体可分为利用多角度、多光谱的遥感方法和将地表温度与  $\epsilon$  分离的同步反演方法,前者即为“分裂窗技术”,采用大气窗区吸收特性不同的两个临近波段( $B_4: 10.5 \sim 11.3 \mu\text{m}$  和  $B_5: 11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ )的辐射量

收稿日期:2002-10-10;修改稿日期:2002-11-20

基金项目:本文得到中科院知识创新工程项目 KZCX2-204 和教育部博士点基金 NO. 2000028418 资助

第一作者简介:周志恩(1978-),女(汉),重庆人,硕士研究生,现就读于南京大学大气科学系,主要研究边界层气象与大气环境

进行大气订正;后者则主要是 Coll 于 1997 年提出的 TES 算法,即采用辐射传输模式与比辐射率模式相耦合<sup>[3]</sup>,其基本关系如下式

$$\sigma \epsilon T_s^4 = \sigma T^4 \quad (1)$$

其中  $\epsilon$  为比辐射率,  $T_s$  即为所需地表温度。由(1)式可以看到  $\epsilon$  和  $T_s$  同为未知量,由于  $\epsilon$  的确定比较困难,使得  $T_s$  的求解亦较为困难。以往对  $\epsilon$  的处理仅由极为少量的实测资料进行估算,而这就可能是反演误差的重要来源。众所周知,  $\epsilon$  受地表植被类型、土壤湿度、云量(水分)和地表粗糙度等因素的影响很大,且  $\epsilon$  的时间、空间变化都很大,地表温度又对  $\epsilon$  尤为敏感,其中  $\epsilon_4$  和  $\Delta\epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5$  对地表温度的影响最大,若希望反演得到的地表温度更接近实际,如误差小于  $1.0^\circ\text{C}$ ,则  $\Delta\epsilon$  的误差量级必须小于  $0.005$ <sup>[4]</sup>,如何较为准确的估算  $\epsilon$  就成为能否较为精确地反演出地表温度的关键所在。本文试图通过合理的  $\epsilon$ 、 $\Delta\epsilon$  以及经验参数的选取,采用修正的 Uliviriei 分裂窗反演处理,给出由卫星观测资料得出地面温度的计算结果。有关分裂窗反演方法计算地表温度,可参见综合报告<sup>[15]</sup>。

## 1 计算方法

卫星观测数据提供了地表覆盖的概貌,以及植被的一些特征信息,并且可进行长时间的积累,时间分辨率很高,因此 AVHRR 数据极有应用价值。其中 CH1 的值依赖于红光波段对被叶绿素及其他植物色素吸收的敏感性,也即依赖于红光对植物光合作用的敏感性;CH2 波段的值依赖于近红外光对绿色叶片的叶肉组织结构的敏感性。已有研究表明<sup>[5]</sup>:近红外光和红光的比率与植被之间存在相关的原因在于,这个比率直接与植物光合作用能力及植物叶面水分蒸腾的阻力有关。利用 NDVI 的方法有个突出优点,就是能够大大减少计算太阳高度角的差别,即能够消除由于卫星观测对不同遥感区域和轨道差异而带来的植被指数变化,表现出稳定的遥感特征<sup>[5]</sup>。同时,通过地面实验,Griend 和 Owe<sup>[6]</sup>发现 NDVI 和比辐射率  $\epsilon$  之间有很强的相关性,相关系数达到  $0.941$ 。并且由于城市域范围有限,可认为区域水汽状况一致,因而可直接利用亮温表征城市热场<sup>[7]</sup>。

### 1.1 计算归一化植被指数 NDVI

$$NDVI = (\rho_{CH2} - \rho_{CH1}) / (\rho_{CH2} + \rho_{CH1}) \quad (2)$$

其中,  $\rho_{CH1}$  为可见光波段的反射率,  $\rho_{CH2}$  为近红外波段的反射率。NDVI 的值在  $-1$  到  $+1$  范围内,值越大,表示绿色植被越多;而在有云体及水面上测到的值可能为负。

### 1.2 计算地表比辐射率 $\epsilon$

利用 NDVI 近似计算像元的等效比辐射率采用公式:

$$\epsilon = 1.0094 + 0.047 \ln(NDVI) \quad (3)$$

在修正的分裂窗算法中采用的是 4,5 两个波段的比辐射率,Josef 等人<sup>[8]</sup>在已有工作<sup>[6][9]</sup>基础上计算出 AVHRR 的  $\epsilon_4$  和  $\Delta\epsilon$ ,公式如下:

$$\epsilon_4 = 0.9897 + 0.029 \ln(NDVI) \quad (4)$$

$$\Delta\epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5 = 0.01019 + 0.01344 \ln(NDVI) \quad (5)$$

### 1.3 计算地表温度 LST

在无云条件下,传感器在波段  $i$  接受到的辐射用如下辐射传输公式表示:

$$B_i(T_i) = \tau(\theta) [\epsilon_i B_i(T) + \rho_i R_i \downarrow] + R_i \uparrow(\theta) \quad (6)$$

其中,  $B$  为波段  $i$  的普朗克函数,  $T_i$  为波段  $i$  的亮温,  $\tau_i(\theta)$  为波段  $i$  在天顶角为  $\theta$  时候的大气透

过率,  $\epsilon_i$  为波段  $i$  的陆地表面比辐射率,  $T$  为真实地表温度,  $\rho_i$  为波段  $i$  的双向反射率,  $R_{i\downarrow}$  为波段  $i$  的半球下行大气辐射,  $R_{i\uparrow}(\theta)$  为波段  $i$  的发射方向为  $\theta$  时的大气上行辐射。直接测算公式(6)中的各个分量是比较复杂不易确定的<sup>[10]</sup>。同时,在热红外波段的大气吸收过程中,水汽是影响辐射传输的最重要因子。许多研究者基于各自所做的实测分析得到简化的辐射传输方程,提出了不同的修正分裂窗算法,以尽可能真实地获取地表温度。根据文献使用情况认为,Becker & Li 和 Ulivieri 的算法由于使用 4,5 两通道的平均值  $\epsilon$  和差值  $\Delta\epsilon$ , 相比于使用单独的  $\epsilon_4$  和  $\epsilon_5$  计算得到的地表温度更为准确<sup>[10]</sup>。Becker & Li 的简化计算公式如下:

$$T_s = 1.274 + (T_4 + T_5)/2\{1 + [0.15616(1 - \epsilon)/\epsilon]\} - 0.482(\Delta\epsilon/\epsilon^2) + (T_4 - T_5)/2\{6.26 + [3.98(1 - \epsilon)/\epsilon] + 38.33(\Delta\epsilon/\epsilon^2)\} \quad (7)$$

$$\text{Ulivieri 的简化计算公式为: } T_s = T_4 + 1.8(T_4 - T_5) + 48(1 - \epsilon) - 75(\epsilon_4 - \epsilon_5) \quad (8)$$

通过 Kilmogorov-Svnrnoc 误差分析结果表明,Ulivieri 算法的误差最小,与实测值最为接近,并且它的误差积累最小,不依赖于热量<sup>[11]</sup>。同时采用了 Becker<sup>[12]</sup>所指出的使用分裂窗算法估计地温的误差可以用下式表示:

$$\Delta T = 50[(1 - \epsilon)/\epsilon] - 300(\Delta\epsilon/\epsilon) \quad (9)$$

(7)、(8)、(9)三式中的  $\epsilon = (\epsilon_4 + \epsilon_5)/2$ ;  $\Delta\epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5$ 。故本文所采用的可称作修正的 Vlivieri 分裂窗反演方法。

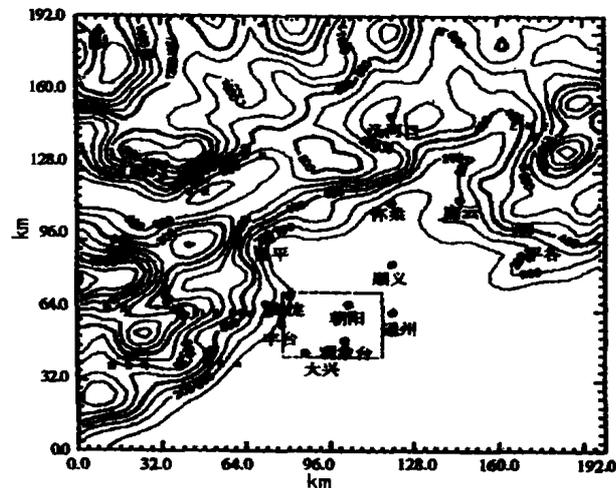


图1 北京地形图(图中标出了北京市各观测站位置及站名)  
图中虚框表示北京城区范围,实线为地形等高线(单位:m)

Fig. 1 The Beijing terrain (including the observed stations, the dashed pane denotes the Beijing urban area, the unit of the terrain's contour is m)

## 2 利用 NOAA-AVHRR 数据的计算分析

### 2.1 分析算例的数据来源

采用北京市气象台提供的 2000 年 1 月至 12 月每月 2 d 的过境瞬时 CH1 (可见光波段  $0.58 \sim 0.68 \mu\text{m}$ ), CH2 (近红外波段  $0.725 \sim 1.10 \mu\text{m}$ ), CH4 (热红外波段  $10.5 \sim 11.3 \mu\text{m}$ ) 和 CH5 (热红外波段  $11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ ) 资料。此卫星资料分辨率为  $0.01^\circ$ 。对比资料为北京地区 18 个地面气象站的地面温度观测数据,单位为  $^\circ\text{C}$ 。

## 2.2 结果与分析

本文工作采用 Ulivieri 的分裂窗算法计算出 2000 年 1 月至 12 月每月连续两天的地表温度,同时利用相应时间的常规气象观测数据,同步寻求城市地表温度的分布规律。在包括北京市气象台提供的具有实测地表温度资料的 18 个站点范围内进行反演计算分析。

北京位于华北平原北端,城区范围地势平坦,但其周围地形极为复杂,北有燕山,西部毗邻太行山,作为上述山系余脉的军都山和西山山地与市区的高度差约为 500~1500 m,并且距离北京城区只有 30~40 km;东南面多平原,属华北平原的一部分。因此北京地区环境特征受其周围地形的影响很大。北京城中心为老城区,新区及卫星城区呈辐射状伸向四面八方。具体北京地区地形及其站点分布如图 1 所示。

### 2.2.1 算例 1

首先分析 1 月 7 日早 8 h 的对应站点情况,表 1 中反演数据基本反映了在石景山、门头沟和观象台一带北京市中心的高温区,最低温度无疑出现在西北角海拔高度最高的佛爷顶,其次的低温出现在东北角的汤河口、密云和怀柔地区。此时为日出升温时段,这一地区由于受密云水库的大面积水体影响而保持低温。

表 1 2000-01-07 08:00 的反演地温与实测地温的比较(单位:℃)

Table 1 Comparison between the retrieved LST and observed LST at 2000-01-07 08:00 (Beijing Local Time) (unit:℃)

站点代号	站点名	经订正后的卫星反演计算结果	实测地表温度
54398	顺义	-21.01	-21.4
54406	延庆	-21.07 *	-22.4
54410	佛爷顶	-23.96	-26.7
54412	汤河口	-19.57	-21.1
54416	密云	-23.8	-25.7
54419	怀柔	-18.32	-15.8
54424	平谷	-16.78	-25.4
54431	通州	-13.98	-17.2
54433	朝阳	-16.29 *	-18.3
54499	昌平	-15.33	-16.7
54501	斋堂	-15.81 *	-18.7
54505	门头沟	-12.87	-14.5
54511	观象台	-13.83	-16.1
54513	石景山	-12.33 *	-19.7
54514	丰台	-17.01 *	-21.3
54594	大兴	-13.03 *	-16.7
54596	房山	-15.41 *	-19.2
54597	霞云岭	-16.91 *	-17.4

表 2 2000-01-10 04:00 的反演地温与 2000-01-10 02:00 的实测地温的比较(单位:℃)

Table 2 Comparison between the retrieved LST at 2000-01-10 04:00 and observed LST at 2000-01-10 02:00 (Beijing Local Time) (unit:℃)

站点代号	站点名	经订正后的卫星反演计算结果	实测地表温度
54398	顺义	-12.94	-14.3
54406	延庆	-19.99 *	-15.8
54410	佛爷顶	-18.71	-18.1
54412	汤河口	-19.93	-16.1
54416	密云	-16.27	-18.4
54419	怀柔	-14.34	-12.9
54424	平谷	-14.60	-16.0
54431	通州	-9.99	-10.5
54433	朝阳	-10.29 *	-14.6
54499	昌平	-12.77	-14.2
54501	斋堂	-15.57 *	-13.7
54505	门头沟	-10.85	-12.8
54511	观象台	-12.13	-13.6
54513	石景山	-9.03 *	-13.7
54514	丰台	-10.23 *	-15.2
54594	大兴	-14.13 *	-16.1
54596	房山	-13.35 *	-13.7
54597	霞云岭	-9.27 *	-11.0

表 1,2 中经过订正后的卫星反演地表温度一栏中,标有 \* 号表示该站点的 NDVI 为负值,原因如计算方法 1.1 中的说明,高空少云且地表多水冰,NDVI 为负值的现象在冬、春季多于夏、秋季节。此时根据历史文献资料比较给定  $\epsilon$ ,产生一定的反演误差; $\Delta\epsilon^{[13]}$  取为 -0.004,满

足反演误差在  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内对  $\Delta\epsilon$  的要求<sup>[4]</sup>。

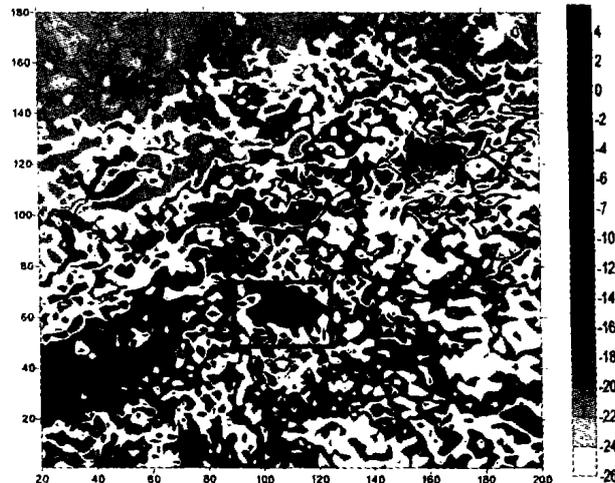


图 2 2000-01-10 04:00 的反演地表温度(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

图中小框为城区范围

Fig. 2 The retrieved land-surface temperature(LST) at 00/01/10/04LT(unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

采用相同的 NDVI 数据,再比较分析 1 月 10 日凌晨 4 点反演的地表温度(图 2)与凌晨 2 点的实测地表温度,由表 2 可以看出,反演计算结果与实测值的吻合程度明显好于 1 月 7 日早 8 h 的计算结果,全部 18 个站点中有 5 个站点的反演地表温与实测地表温度之差小于  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,还有近一半站点的反演温度与实测值之差在  $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内,最大差值不超过  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时可由图 2 所示,最低温出现在延庆、佛爷顶和汤河口一带北方地区,高温区则位于门头沟、石景山、丰台、朝阳和通州一线,包括北京市区及近郊区。这与北京市的特殊下垫面和城市中的人类活动影响密切相关,近 10 a 北京市的发展改变了原有的自然条件,如大部分原有的自然植被为建筑物、沥青或水泥马路等硬化下垫面所代替,绿地面积减少,城市粗糙度加大,市区风速减小,城市人口和工业集中;人们的生产和生活(尤其是冬季的供暖设施)增加了额外的热量,城市工业排放大量烟尘、气溶胶等,首都钢铁公司厂区所在地常年出现高温值。通州一带的高温区表明北京近 10 a 来城市热岛效应加剧可能还与外部周边地区向北京的热能输送有关。同时,我们知道北京地区冬天低层大气流动的日变化很小,风向比较固定,主要是西北和偏北风,因此反演趋势与实际情况相符,主要呈西北低温东南高温的型式,夜间最高温出现在密云一带,可能与密云水库对当地温度的调节作用有关。北京城效温差约为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。具体在  $200\text{ km}\times 200\text{ km}$  的北京及其周边地区网格范围内的反演趋势由图 2 所示,反演得到的温度场空间分辨率  $0.01^{\circ}$ (约为  $1.1\text{ km}$ )。

### 2.2.2 算例 2

通过对 2000 年 4 月 10 日 15:00 的反演地温与 2000 年 4 月 10 日 14:00 的实测地温值比较,以及对 2000 年 4 月 11 日凌晨 06:00 的反演地温与 2000 年 4 月 11 日早 08:00 的实测地温比较。可以看出,对日出时段内(如凌晨 06:00)的反演地温与实测值之差相对于午后时段内(如午后 15:00)的反演地温与实测值之差要小。也即本文采用的 Ulivieri 算法在日出时段内的反演准确率可能高于对午后时段的反演。

### 2.2.3 算例 3

然后再看 2000 年 5 月 7 日凌晨 06:00 的反演情况(图 3),最高地表温度出现在丰台站,与实测最高温完全吻合,次高温出现在怀柔,朝阳、石景山、山头沟和观象台一带。同时对 2000 年 5 月 6 日 15:00 的反演地温与 2000 年 5 月 6 日 14:00 的实测地温进行比较,同样可以发现算例 2 中比较得出的:本文所采用的反演算法对日出时段的反演准确率明显高于对午后时段的反演。

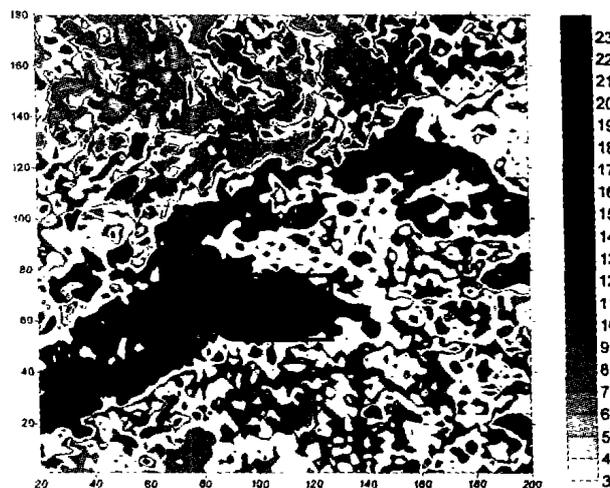


图 3 2000-01-07 06:00 的反演地表温度(单位:℃)

图中小框为城区范围

Fig. 3 The retrieved land-surface temperature (LT) at 00/05/07/06LST(Unit:℃)

由 5 月 7 日凌晨 06:00 的反演地表温度图 3 可看出比较明显的城效温差约在 3~5℃ 左右,高温区基本呈西南—东北走向。当时风向基本为南风偏西南风。此时由官厅水库影响地表温度形成的局地高温现象较密云地区明显。

通过全年 24 个算例基本说明北京的热岛效应一直稳定存在,以海淀为代表,门头沟、石景山、丰台、朝阳、通县一带均为局地高温区,与张光智等<sup>[14]</sup>分析得出的北京市具有城市与卫星城市“热岛”多中心的复杂特征的结论基本一致。这也是现代大都市的一个特点。

## 3 小结与讨论

通过个例分析,可以看出用 Ulivieri 方法可以很好的反演出城市热岛的趋势,并且能较为准确的反映出相对的高温区和低温区。此算法的反演能力在夜间 02 h 最好,其次在凌晨日出时段,对午后时段的反演准确率相对较低。并且在冬季反演的地表温度值偏大而在夏季反演值偏小,秋、冬季的热岛效应较春、夏季而言更为明显。官厅、密云等大型水库都对局地的地表温度有较大影响。因此在以后的工作中还需要选取更多个例来研究此反演算法在较为准确地反演日出时段与午后情形上的能力差异,并且改进观测方法减小误差,适当改动反演公式中的经验参数,尤其是在有云、水体和夏季湿度较大的情况下,以及在 DNVI 为负值时刻与比辐射率  $\epsilon$  之间的关系,以期获得更为准确的反演地表温度值。

如果在 NOAA 气象卫星过境时获取同步的气象数据和地面实测数据,同时使用更高分辨

率的卫星资料,可以反演出空间精度更高,更准确的区域地表温度。使用改进的分裂窗算法是一种可行的反演地表温度的方法,在缺乏地面气象观测资料的情况下,可利用其反演出地表温度场,揭示部分城区热岛特征,并进一步提出城市热岛效应在数值模式中的合理计算方案,同时可进一步应用于宏观规律的研究。对于这些方面的工作研究都是我们下一步应该着重考虑的。

#### 参 考 文 献

- 1 濮静娟,董卫东,关燕宁,等. 热红外遥感用于徒河水库生态环境研究. 遥感学报,1997,1(4):290~297
- 2 秦益,田国良. NOAA-AVHRR 图像大气影响校正方法研究及软件研制. 环境遥感,1994,9(1):11~20
- 3 CollC, Cacelles V, Schmutge TJ. Estimation of Land Surface Emissivity Difference in Split Window Channels of AVHRR. Remote Sens. Envir. ,1994,48:127~134
- 4 杨文. 光谱比辐射率对卫星遥感地表温度影响的研究. 高原气象. 1997,16(1):36~44
- 5 史培军,宫鹏. 土地利用覆盖变化研究方法与实践. 北京科学出版社,2000. 67~48
- 6 Van De Griend, A. A. and M. Owe. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. International Journal of Remote Sensing,1993,14:1119~1131
- 7 陈云浩. 热图像的梯度噪声剔除法及其温度场的标定. 遥感信息,1999,11(3):128~134
- 8 Josef Cihlar, Hung Ly, Zhanqing Li, Jing Chen, Hartley Pokrant and Fengting Huang. Multitemporal, multichannel AVHRR data sets for land biosphere studies - artifacts and corrections. Remote Sensing of Environment, 1997,60:35~57
- 9 Salisbury, J. W. and D. M. D'Aria. Emissivity of terrestrial material in the 3~5 mm atmospheric window. Remote Sensing of Environment, 1994,47:345~361
- 10 Gupta P K, S Prasad, M V R Sessa Sai and T S Viswanadham. The estimation of surface temperature over and agricultural area in the state of Haryana and Panjab India, and its relation with the normalized difference vegetation index (NDVI), using NOAA-AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 1997,18:3729~3741
- 11 J. Kerényi and M. Putsay. Investigation of land surface temperature algorithms using NOAA-AVHRR IMAGES. Adv. Space Res. ,2000,26(7):1077~1080
- 12 Becker F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite. International Journal of Remote Sensing, 1987,8:1509~1522
- 13 Sobrino J A and V Caselles. A methodology for obtaining the crop temperature from NOAA-9AVHRR data. Int. J. Rem. Sens. ,1991,12:2481~2476
- 14 张光智. 北京及周边地区城市尺度热岛特征及其演变. 应用气象学报,2002,13:43~49
- 15 俞宏,石汉青. 利用分裂窗法反演陆地表面温度的研究进展. 气象科学,2002,22(4):494~500

## THE APPLICATION OF THE REMOTE SENSING RETRIEVED DATA TO THE RESEARCH OF THE METEOROLOGICAL ENVIRONMENT OVER THE URBAN AREA

Zhou Zhien<sup>1</sup> Jiang Weimei<sup>1</sup> Hu Fei<sup>3</sup> Xi Wen<sup>2</sup>

(1 Dept. of Atmos. Sci. Nanjing Univ., Nanjing 210093)

(2 Beijing Meteo. Bureau, Beijing 100089)

(3 LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029)

**Abstract** Nowadays, the remote sensing observed data are easily available in almost every meteorological section in China. So it is urgent that how to use rationally these data in the urban meteorological services and the urban construction plan. With the limited remote sensing data from the NOAA—AVHRR, this paper uses the revised Ulivier's split—Window algorithm to retrieve and reveals the distribution characteristics of the Land—Surface temperature over the Beijing Area of 200 km×200 km. The result can reflect well the higher temperature area and the lower one.

**Key words** Urban heat island Land—surface temperature(LST) Remote sensing retrieved data Normally different vegetable index (NDVI)