

侯英雨, 张佳华, 延昊, 等. 利用卫星遥感资料估算区域尺度空气温度[J]. 气象, 2010, 36(4): 75-79.

利用卫星遥感资料估算区域尺度空气温度^{* 1}

侯英雨¹ 张佳华² 延昊¹ 王建林¹

1 国家气象中心, 北京 100081

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

提 要: 空气温度是地球大气系统能量和水分循环的关键参数, 气象台站观测的空气温度是单点观测的, 空间代表性较差, 在区域尺度模型中应用还存在一些问题, 作者提出了一个从卫星遥感资料直接反演空气温度的新方法。基于 NOAA-AVHRR 资料反演的地表温度(Land Surface Temperature, T_{LS})和地面观测的空气温度(Air Temperature, T_a)的相关关系, 建立了稀疏植被区域不同高程范围的空气温度遥感估算统计方法; 基于 NDVI 和 T_{LS} 的梯形空间特征关系, 建立了在中、高植被覆盖区域的空气温度遥感估算物理方法。经检验, 稀疏植被区域空气温度反演绝对误差在 1.5~1.8 °C 之间, 中、高植被覆盖区域空气温度反演平均绝对误差为 1.61 °C, 表明作者提出的空气温度遥感反演方法是可行的。

关键词: 植被指数, 地表温度, 空气温度, 反演方法

Air Temperature Retrieval from Remote Sensing Data at Regional Level

HOU Yingyu¹ ZHANG Jiahua² YAN Hao¹ WANG Jianlin¹

1 National Meteorological Center, Beijing 100081

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: A new approach was developed to retrieve air temperature from remotely sensed data. In a sparse vegetation region, based on the relation between air temperature (T_a) and land surface temperature (T_{LS}), three linear regression equations have been established according to the different grade of elevation. In a dense vegetation region, “ $V_i - T_s$ ” (vegetation index-surface temperature) method is used for the estimation of air temperature. Air temperature from this prototype algorithm is validated using NOAA-AVHRR data with actual observations of air temperature at China meteorological stations. The error in the sparse vegetation is about 1.5–1.8 °C ($R^2=0.89$) and the error in the dense vegetation is averagely 1.61 °C ($R^2=0.90$). The results show that algorithm for estimating air temperature has a high accuracy and can be used in operation.

Key words: vegetation index, land surface temperature, air temperature, retrieval method

引 言

空气温度是表示热量特征的重要指标之一, 是进行热量资源分析、自然区划、农业生产潜力估算的重要参数^[1-2]。空气温度也是地球大气系统能量和水分循环的关键参数, 在陆地过程模式、气候和数值天气预报区域或全球模式中扮演着越来越重要的角

色。气象数据都是单点观测的, 气象观测台站数量有限而且分布不均匀, 空间代表性较差, 在区域尺度模型中应用还存在一些问题。因此许多空间插值方法如反距离加权插值法、最近邻点插值法、多元回归法、三角网线性插值法、三次 B 样条法、克里格法等 在气象学领域得到广泛的应用。然而不同插值方法的优化权重标准是不一样的, 如果观测点足够多, 大多数插值技术得到的结果基本相似, 如果观测站点

* 国家科技部“十一·五”科技支撑项目 2006BAD04B04 和 2006BAD04B10 共同资助

2008 年 12 月 18 日收稿; 2009 年 11 月 26 日收修定稿

第一作者: 侯英雨, 从事农业气象遥感技术研究. Email: yyhou@cma.gov.cn

比较稀疏,不同的插值方法得到的结果差别比较大。遥感技术的发展为获取区域尺度的地表参数提供了一个重要手段。目前不少学者对陆地表面温度遥感反演方法进行了大量的研究,反演误差基本在 1°C 之内^[3-5],但从遥感探测数据中直接提取空气温度在精度上还很难满足气象业务应用需求。

当前从卫星遥感观测数据估算空气温度方法的研究比较多。一是直接从卫星遥感反演的地表温度(Land Surface Temperature, T_{LS})和气温的统计关系来推算。如 Chen 等^[6]研究发现利用 GOES 静止气象卫星的热红外数据推算的空气温度与实际 1.5 m 观测空气温度的线性回归系数 $R^2=0.76$,回归方程的标准差为 $1.3\sim 2.0^{\circ}\text{C}$ 。Horiguchi 等^[7]也利用 1.5 m 高度气象台站观测的实际空气温度与静止气象卫星反演的地表温度进行回归分析,发现估算的空气温度误差在 $1\sim 1.7\text{K}$ 。最近,Green 等^[8]发现在非洲和欧洲大陆,从 AVHRR 反演的 T_{LS} 与气象台站观测的月平均温度有着连续显著的相关性。

另一种方法主要是基于 NDVI 和 T_{LS} 的梯形或三角形的空间特征关系。由于植被的数量在空间分布上是趋于不均匀的,观测的 T_{LS} 将随植被的变化而变化^[9]。Saravanapavan 等^[10]研究认为 T_{LS} 随着 NDVI 的增加而降低,空气温度可以通过全覆盖植被的 NDVI 值外插来估算。在浓密植被覆盖条件下,植被的冠层温度几乎接近其周围空气温度。因此基于 T_{LS} 和 NDVI 空间特征关系的空气温度估算方法被提出来,即“ $V_i - T_s$ ”(Vegetation Index-Surface Temperature)方法^[11-13]。该方法对于中、高植被覆盖区域比较适用,但对于稀疏植被地区,误差很大。

笔者在前人的研究基础上,分别建立了稀疏植被($\text{NDVI} \leq 0.25$)和中、高覆盖植被($\text{NDVI} > 0.25$)^[14]地区的空气温度遥感反演方法。

1 数据与方法

1.1 地表温度反演原理与方法

目前从卫星遥感反演地表温度的主要方法有单一红外通道法、分裂窗法、日夜法等^[3]。本文采用常用的分裂窗算法,其基本原理如下,

由于在 $10.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$ 波长之间,太阳辐射非常弱,利用卫星传感器获得辐射亮度值 $R(\mu)$ 可以利

用辐射传输公式描述^[15-16],

$$R(v_i, \mu) = B(v_i, T_s) \epsilon(v_i, \mu) \tau(v_i, \mu, p_s) + R_a(v_i, \mu) + \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mu' f_r(v_i, -\mu', \phi') \times R_d(v_i, -\mu', \phi') \tau(v_i, -\mu', \phi', p_s) d\mu' d\phi' \quad (1)$$

式中 $R(v_i, \mu)$ 是波段辐射的平均测量值, v_i 为波数, μ 是当地观测天顶角的余弦, $B(v_i, T_s)$ 是地表温度为 T_s 的普朗克函数, $\epsilon(v_i, \mu)$ 是地表有效比辐射率, $\tau(v_i, \mu, p_s)$ 是沿 θ 观测角从大气压为 p_s 的地表到大气顶层的大气整层透过率。上式右边第一项是地表辐射经大气削弱到达传感器的部分,第二项是大气上行辐射,第三项大气下行辐射经地表反射并穿过大气达到传感器的部分。

在分裂窗反演地表温度的算法中,主要的参数有地表温度 T_s 、大气状况、分裂窗两个波段的观测辐射亮度值和两个波段的地表发射率值。利用 AVHRR 的第 4 和第 5 通道的观测值 T_4 和 T_5 以及两个通道的发射率 ϵ_4 和 ϵ_5 ,可以得到地表温度的解析公式:

$$T_s = (A_1 + A_2 \frac{1-\epsilon}{\epsilon} + A_3 \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon^2}) \frac{T_4 + T_5}{2} + (B_1 + B_2 \frac{1-\epsilon}{\epsilon} + B_3 \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon^2}) \times (T_4 + T_5) + C \quad (2)$$

ϵ 为 AVHRR 第 4、5 通道地表发射率的平均值, $\Delta\epsilon$ 为 AVHRR 第 4、5 通道地表发射率之差。 A_1 、 A_2 、 A_3 和 B_1 、 B_2 、 B_3 、 C 为方程系数。许多学者基于各自简化的辐射传输方程提出了许多修正的分裂窗算法,其中 Ulivieri 等^[17]提出的分裂窗算法最具代表性:

$$T_s = T_4 + 1.8(T_4 - T_5) + 48(1 - \epsilon) - 75\Delta\epsilon \quad (3)$$

式中, T_4 、 T_5 分别为 AVHRR 第 4、5 通道亮温(K); ϵ_4 和 $\Delta\epsilon$ 可通过 NDVI 来计算,其算式如下^[18]:

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

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

$$\epsilon = (\epsilon_4 + \epsilon_5) / 2 \quad (6)$$

式中, ϵ_4 、 ϵ_5 分别为 AVHRR 第 4、第 5 通道地表发射率。

1.2 基于地表温度的稀疏植被区域的空气温度遥感估算方法

按照地形差异(分为三类: $0\sim 500\text{m}$ 、 $500\sim 1000\text{m}$; 1000m 以上),根据不同季节无云干扰的 NOAA-AVHRR 资料反演的 T_{LS} 和相应时间段的

地面气象站 1.5 m 处观测的空气温度,分别建立了不同高程类型的 T_{LS} 与空气温度 T_a 的相关关系(见图 1、图 2、图 3),参与建模的 NOAA-AVHRR 资料来自中国气象局国家卫星气象中心,资料覆盖范围为中国区域,过境时间分别是 2006 年 3 月 2 日 14 时 27 分、2006 年 11 月 21 日 14 时 39 分、2006 年 12 月 15 日 12 时 15 分、2007 年 5 月 2 日 13 时 37 分、2007 年 6 月 2 日 13 时 18 分、2007 年 7 月 6 日 14 时 9 分、2007 年 8 月 22 日 12 时 45 分。

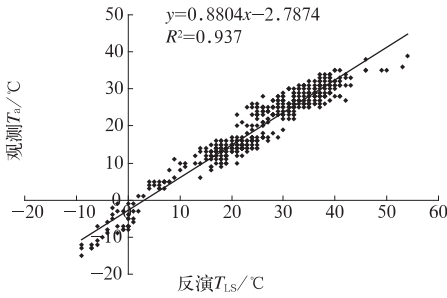


图 1 地表温度 T_{LS} 与空气温度 T_a 的关系 (NDVI<0.25; 高程:0~500 m)
Fig.1 The relation between T_{LS} and T_a (NDVI<0.25; Elevation: 0~500 m)

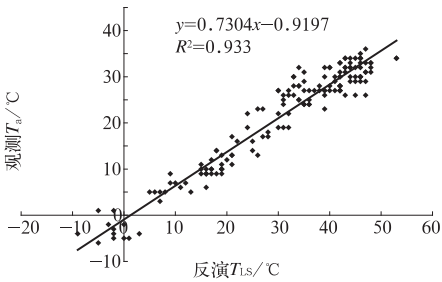


图 2 地表温度 T_{LS} 与空气温度 T_a 的关系 (NDVI<0.25; 高程:500 m~1000 m)
Fig.2 The relation between T_{LS} and T_a (NDVI<0.25; Elevation: 500~1000 m)

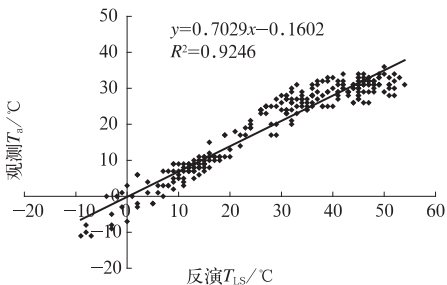


图 3 地表温度 T_{LS} 与空气温度 T_a 的关系 (NDVI<0.25; 高程:1000 m 以上)
Fig.3 The relation between T_{LS} and T_a (NDVI < 0.25; Elevation: above 1000 m)

从图 1、图 2、图 3 可以看出,在稀疏植被地区, T_{LS} 与空气温度具有明显的相关性,相关系数 R^2 均超过了 0.92,说明在稀疏植被区域可以基于 T_{LS} 和空气温度的相关关系来推算空气温度。

1.3 基于 $V_i - T_s$ 的中、高植被覆盖区域空气温度遥感反演方法

1.3.1 “干边”和“湿边”的确定

图 4 是植被指数与地表温度的散点示意图。假定不同植被指数下的地表温度上限称为“干边”(“Warm Line”),地表温度下限称为“湿边”(“Cold Line”)。通过植被指数 $NDVI$ 和地表温度 T_{LS} 的线性回归,可以分别获取干边、湿边方程,具体如下,

$$T_{LSNDVI_{i,max}} = a_1 + b_1 \times NDVI_i \quad (7)$$

$$T_{LSNDVI_{i,min}} = a_2 + b_2 \times NDVI_i \quad (8)$$

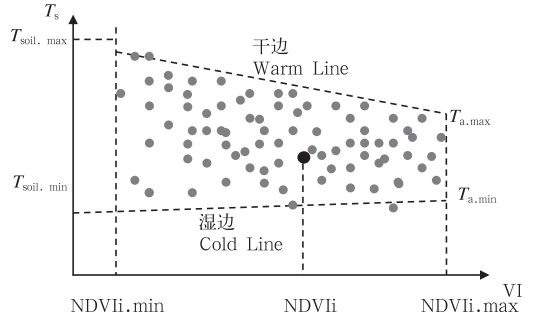


图 4 $V_i - T_s$ 特征空间示意图
Fig.4 Sketch map of $V_i - T_s$

当 $NDVI_i$ 等于 $NDVI_{min}$ 时,计算得到的 $T_{LSNDVI_{i,max}}$ 和 $T_{LSNDVI_{i,min}}$ 分别对应裸地最大地表温度 $T_{soil,max}$ 和最小地表温度 $T_{soil,min}$ 。当 $NDVI_i$ 等于 $NDVI_{max}$ 时,计算得到的 $T_{LSNDVI_{i,max}}$ 和 $T_{LSNDVI_{i,min}}$ 分别对应最大空气温度 $T_{a,max}$ 和最小空气温度 $T_{a,min}$ (在此,假定全植被覆盖条件下, T_{LS} 近似于空气温度)。

1.3.2 空气温度的确定

首先根据“干边”和“湿边”方程,分别求算任意 $NDVI_i$ 下的 $T_{LSNDVI_{i,max}}$ 和 $T_{LSNDVI_{i,min}}$ 。然后根据图 4 的梯形几何关系,可以推断 $NDVI_i$ 下的空气温度,具体公式如下:

$$T_a = \frac{T_{LSNDVI_{i,max}} - T_{LSNDVI_{i,min}}}{T_{LSNDVI_{i,max}} - T_{LSNDVI_{i,min}}} (T_{a,max} - T_{a,min}) \quad (9)$$

1.4 结果分析与检验

1.4.1 稀疏植被区域的空气温度遥感估算方法的验证

对于稀疏植被覆盖区域,挑选未参与建模的中国区域 NOAA-AVHRR 遥感资料,成像时间分别是 2007 年 5 月 4 日 14 时 49 分、2007 年 5 月 20 日

13 时 52 分、2007 年 7 月 21 日 14 时 57 分,利用已经建立的遥感统计模式来推算空气温度。从图 5 和

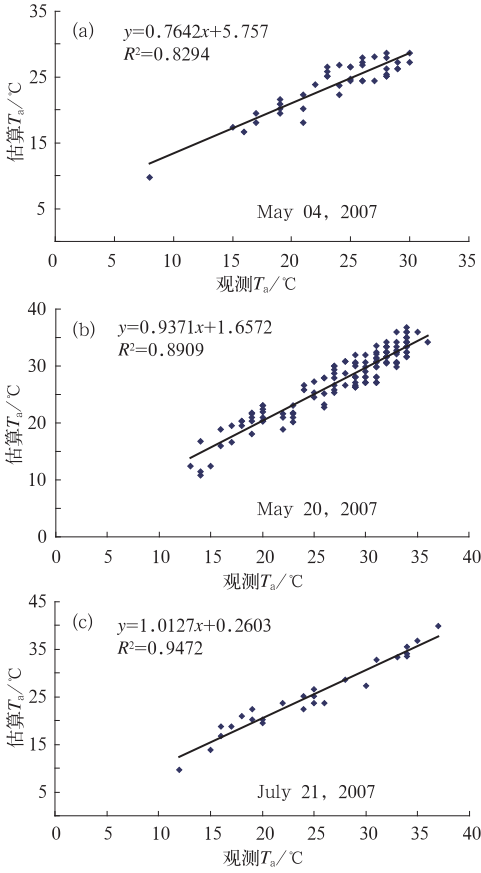


图 5 稀疏植被区反演的空气温度与实际观测值的比较

(a) 2007 年 5 月 4 日; (b) 2007 年 5 月 20 日; (c) 2007 年 7 月 21 日

Fig. 5 Comparison of air temperatures in sparse vegetation regions between inversed from remote sensing data and observed at ground meteorological stations (c)

表 1 的结果可以看出,遥感统计模式的精度较高,平均绝对误差在 1.5~1.8 °C 之间,相关系数在 0.9 以上。

表 1 稀疏植被区域的空气温度遥感反演方法的检验
Table 1 Validation of air temperature inversed from remote sensing data in sparse vegetation regions

日期/年.月.日	拟合方程	相关系数 R^2	样本数	平均绝对 误差/ $^{\circ}\text{C}$
2007.05.04	$y=0.7642x+5.757$	0.8294	41	1.76
2007.05.20	$y=0.9371x+1.6572$	0.8909	132	1.64
2007.07.21	$y=1.0127x+0.2603$	0.9472	26	1.51

1.4.2 中、高植被覆盖区域的空气温度遥感估算方法的验证

对于中、高植被覆盖区域,挑选中国区域晴空范围相对较大的 NOAA-AVHRR 卫星遥感数据,基于文中第 1.3 节中提出的空气温度反演方法,获得空气温度的空间网格分布图;同时选择晴空像元对应的相近时间的地面实测空气温度对其反演结果进行检验。参与验证的卫星资料的成像时间分别是 2007 年 8 月 22 日 12 时 45 分、2007 年 7 月 6 日 14 时 9 分、2007 年 6 月 2 日 13 时 18 分、2007 年 5 月 2 日 13 时 37 分、2006 年 3 月 2 日 14 时 27 分。比较结果见图 6 和表 2,其相关系数达到了 0.95,平均绝对误差为 1.61 $^{\circ}\text{C}$,样本数为 163 个。

2 结论与讨论

文中提出了不同植被覆盖条件下的空气温度卫星遥感估算新方法。在稀疏植被地区,按高程分成三类:0~500 m、500~1000 m、1000 m 以上,基于地

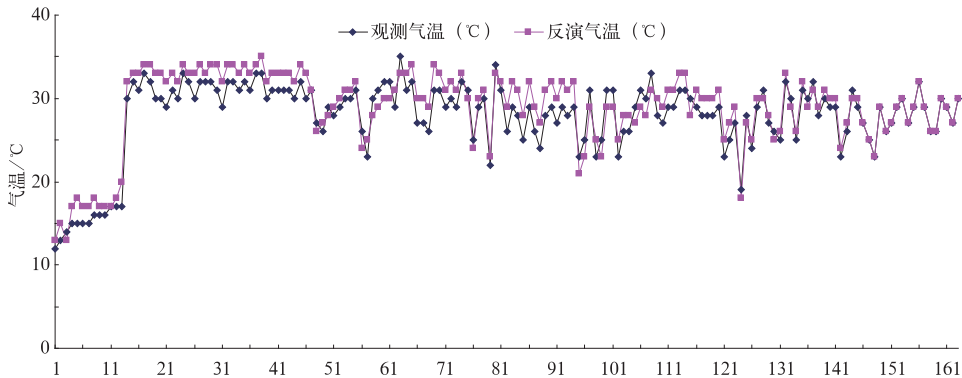


图 6 中、高植被覆盖区反演的空气温度与实际观测值的比较

Fig. 6 Comparison of air temperatures in dense vegetation regions between inversed from remote sensing data and observed at ground meteorological stations

表 2 中、高植被覆盖区域的空气温度遥感反演的检验

Table 2 Validation of air temperature inverted from remote sensing data in dense vegetation regions

日期/年.月.日	样本数	平均绝对误差/℃
2006.03.02	13	1.6
2007.05.02	33	2.02
2007.06.02	19	1.47
2007.07.06	16	1.75
2007.08.22	82	1.45

表温度 T_{LS} 和地面观测空气温度的相关关系,分别建立了不同高程范围空气温度的遥感估算统计模型。在高植被覆盖区域,基于 NDVI 和 T_{LS} 的梯形空间特征关系,建立了空气温度的遥感估算物理模型。

经过实测资料验证表明,本文提出的空气温度遥感估算是可行的。稀疏植被区域估算误差在 $1.5 \sim 1.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,估算值与地面实测值的相关系数在 0.9 以上。高植被覆盖区域,估算空气温度的平均绝对误差为 $1.61 \text{ }^{\circ}\text{C}$,相关系数达到了 0.95。

本文选取的 NOAA-AVHRR 卫星资料均是中国气象局北京卫星地面站接收的,覆盖范围为我国中部和东部地区,因此在稀疏植被覆盖区建立的空气温度与遥感反演的地表温度之间的统计关系,不一定适合于我国西部地区。基于地表温度和植被指数空间特征关系的空气温度估算是动态的,“干边”和“湿边”方程系数随着卫星资料成像时间的变化而变化。

另外,由于地面空气温度是每 3 小时观测一次,卫星过境很难与地面观测时间一致,存在一个时间差,在验证过程中,只能选择相近时次的资料进行检验。

参考文献

- [1] 廖顺宝,李泽辉,游松财. 气温数据栅格化的方法及其比较[J]. 资源科学,2003,25(6):83-88.
- [2] 张月维,何全军,赵晓利,等. 2005 年 7 月珠三角地表温度场的遥感监测分析[J]. 气象,2006,32(9):23-27.
- [3] Wan Z M. MODIS land surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD) [OL]. version3. 3. 1999. <http://eosps0.gsfc.nasa.gov>.
- [4] Kerr Y H, Lagouarde J P, Imberton J. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 41: 197-209.
- [5] Wan Z M, Feng Y Z, Zhang Y L, et al. land-surface temperature and emissivity retrieval from MODIS Airborne Simulator(MAS) data[C]. Summaries of the seventh JPL Airborne Earth Science workshop 1998. 3:57-66.
- [6] Chen E, Allen L H, Bartholic J F, et al. Comparison of winter-nocturnal geostationary satellite infrared-surface temperature with shelter-height temperature in Florida[J]. Remote Sensing of Environment, 1983, 13, 313-327.
- [7] Horiguchi I, Tani H and Motoki T. Accurate estimation of 1.5 m-height air temperature by GMS IR data[C]. Pro 24 th Int. Cymp. On Rem. Sens. Envir. Rio de Janeiro May 1991, 301-307, 1992.
- [8] Green R. The potential of Pathfinder AVHRR data for providing surrogate climatic variables across africa and Europe for epidemiological applications[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2-3):166-175.
- [9] Nemani RR and Running SW. 1989. Estimation of resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 28, 176-294.
- [10] Saravanapavan T and Dye D G. 1995. Satellite estimation of environmental variables by the contextual analysis method; validation in seasonal tropical environment[G]. Global Engineering Laboratory Institute of Industrial Science University of Tukyoo, Japan, 1995.
- [11] Prince S D and Goward S N. Global primary production: a remote sensing approach[J]. Journal of Biogeography, 1995, 22: 2829-2849.
- [12] Czajkowski K P, Mulhern T, Goward S N, et al. Biospheric environmental monitoring at BOREAS with AVHRR observations [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102, 29651-29662.
- [13] Prihodko L, Goward S N. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 60, 335-346.
- [14] 韩丽娟,王鹏新,王锦地,等. 植被指数-地表温度构成的特征空间研究[J]. 中国科学 D 辑 地球科学,2005,35(4):371-377.
- [15] Wan Z M and Dozier J. A generalize split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space[J], IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(4): 892-905.
- [16] 刘玉洁,杨忠东. 遥感信息处理原理与算法[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [17] Ulivieri C, Castronuovo MM, Francioni R, et al. A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites [J]. Advances in Space Research, 1994, 14(3): 59-65.
- [18] Josef C, Hung L, Li Z Q, et al. Multitemporal, multichannel AVHRR datasets for land biosphere studies-arti-facts and correction[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 60:35-57.