

干旱区精河流域地表温度的模型反演研究

王明霞, 毋兆鹏

(新疆师范大学地理科学与旅游学院地理系, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘 要:以精河流域绿洲为研究区,使用 Landsat ETM⁺ 数据,采用单窗算法和普适性单通道算法对研究区地表温度进行反演,并将这两种算法的反演结果与研究区 MODIS 温度产品(MODIS LST)进行比较。结果表明:(1) 单窗算法和普适性单通道算法反演的结果总体趋势比较接近,研究区整体的平均温度相差约 2k;(2) 采用改进型土壤调整植被指数(MSAVI)代替归一植被指数(NDVI)计算地表比辐射率可有效提高反演精度,并且同等条件下单窗算法的反演精度高于普适性单通道算法,两种算法的反演结果与 MODIS LST 的相关系数分别是 0.9255 和 0.8651;(3) 在城镇区域,普适性单通道算法反演结果与 MSAVI 的相关性高于单窗算法,相关系数为 0.8136,说明普适性单通道算法更适合干旱区大范围城镇地表温度的反演研究。

关键词: 精河流域;地表温度;反演;ETM⁺ 影像

中图分类号: P468.0⁺21 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)04-0222-05

Study on retrieval model of land surface temperature
in Jinghe watershed in arid region

WANG Ming-xia, WU Zhao-peng

(Department of Geography, Geography and Tourism Science Institute, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China)

Abstract: Based on Landsat ETM⁺ image data in Jinghe watershed oasis, both methods of mono-window algorithm and single-channel algorithm were adopted to retrieve land surface temperature (LST) in the study area, and the comparison between the retrieved results and MODIS temperature products (MODIS LST) was made. The results showed: (1) The retrieved results from these two algorithms were similar each other in overall trend, and the mean temperature difference of the whole study area was about 2k. (2) The retrieval accuracy could be improved effectively by using modified soil-adjusted vegetation index (MSAVI) instead of normalized differential vegetation index (NDVI) to compute land surface emissivity, and the retrieval accuracy of single-window algorithm was higher than that of single-channel algorithm. The correlation coefficients between the retrieved data of these two algorithms and MODIS LST were 0.925 and 0.8651, respectively. (3) In the urban areas, the correlation coefficient between the retrieved data of single-channel algorithm and MSAVI was 0.8136, being higher than that of mono-window algorithm. Therefore, the method of single-channel algorithm was more suitable for the retrieval research of LST in urban areas in large scale.

Keywords: Jinghe watershed; land surface temperature; retrieval; ETM⁺ image

地表温度不仅是陆地表面能量和水分平衡的重要因子,而且对区域的土地退化、盐化、沙化和侵蚀以及气候变化有着重要的指示作用。由于陆地表面的非均质性,地表温度在小范围内就可能发生较大变化,地表温度的定点观测资料难以反映区域内地表温度的空间分布和变化。因此,热红外遥感已成为监测大范围地表温度空间分布和变化的有效途径。

单波段热红外遥感监测地表温度的方法主要包括:辐射传导方程法(又称大气校正法)^[1]、覃志豪等的单窗算法^[2]和 Jimenez-Munoz 等的普适性单通道算法^[3]。辐射传导方程法计算过程复杂,需要对卫星过境时的大气剖面数据进行大气模拟,由于卫星过境时间较短,实时大气剖面数据获取困难。因此,多数情况下,大气剖面数据被标准大气剖面数据或非实时大气探空数据替代,计算误差较大。在缺少

收稿日期:2013-06-10
基金项目:新疆维吾尔自治区重点实验室“新疆干旱区湖泊环境与资源实验室”基金(XJDX0909201206)
作者简介:王明霞(1987—),女,四川人,硕士研究生,从事资源与遥感监测方向研究。E-mail: wangmingxia1987@163.com。
通信作者:毋兆鹏(1976—),男,陕西人,博士,从事 3S 技术与绿洲资源开发研究。E-mail: wuzhaopengxj@sina.com。

实时大气剖面数据的条件下,单窗算法和普适性单通道算法把大气和地表的影响直接包括在计算公式中,计算过程简单易行并且反演精度较高^[4-6]。因此,本文选取干旱区典型样地为靶区,应用单窗算法和普适性单通道算法反演研究区地表温度,以MODIS温度产品作为验证,对两种反演算法的结果和精度进行比较分析。

1 研究区概况与数据选取

1.1 研究区概况

研究区位于82°40′~83°10′E,44°20′~44°50′N,包含整个艾比湖湖区和精河流域绿洲,总面积2 572.30 km²。研究区地势南高北低,由南向北呈扇状坡面,中部为冲积—洪积倾斜平原,地形平坦开阔,多为荒漠、戈壁和耕地,平均海拔230~440 m。艾比湖位于研究区北部,是新疆境内第二大咸水湖,平均深度2~3 m。该区地处亚欧大陆腹地,远离海洋,属典型的温带大陆性气候,冬夏冷热悬殊,昼夜温差大,干燥少雨,蒸发量大,年平均气温7.2℃,年平均降水量102 mm。

1.2 数据来源

1.2.1 反演数据 美国陆地卫星 Landsat ETM⁺ 于1999年4月15日发射升空,2003年由于机载扫描校正器发生故障,影像数据出现部分重叠和丢失,但是数据保留了良好的几何性质,加以修复仍然可以在一些特殊领域使用。ETM⁺ 由8个波段组成,仅有一个热红外波段,波长范围为10.45~12.5 μm,空间分辨率为60 m,可用来分析地表热辐射和区域温度差异。因此,本文采用2012年6月19日的 Landsat ETM⁺ 数据反演精河流域的地表温度。

ETM⁺ 影像的修复主要运用了 ALR 法,该方法是在局部直方图匹配算法基础上提出的。首先通过回归方程建立两幅图像灰度值的联系,其次将填充影像的色调向待修复影像靠近,以此来填补待修复影像的缺行^[7]。在修复前,填充图像必须以待修复图像为基准进行配准,然后计算图像缺行中每个像元的灰度填充值,将灰度值填充到待修复图像相应位置中,完成影像修复。

1.2.2 验证数据 MODIS 温度产品(MODIS LST)是MOD11A2数据的重要组成部分,空间分辨率为1 km。MODIS LST是由MODIS31、32波段的发射率数据通过劈窗算法计算获得,该产品包括了各种地表类型的温度,精度较高。因此,研究选取了2012年6月17日8d合成的MOD11A2数据对两种算法的反演结果进行验证。

2 研究方法

2.1 单窗算法

2001年,覃志豪等根据地表热辐射传导方程,建立了适用于 Landsat TM6 波段反演地表温度的单窗算法^[2],计算公式为:

$$T_s = \{a(1 - C - D) + [b(1 - C - D) + C + D]T_{\text{sensor}} - DT_a\} / C \quad (1)$$

式中, a, b 是参考系数, $a = -67.355351, b = 0.458606$; T_{sensor} 是传感器亮温(k); T_a 为大气平均作用温度(k); C 和 D 是中间变量,可由公式(2)、(3)、(4)计算获得:

$$C = \varepsilon \tau \quad (2)$$

$$D = (1 - \tau)[1 + \tau(1 - \varepsilon)] \quad (3)$$

$$T_a = 16.0110 + 0.92621 T_o \quad (4)$$

式中, ε 是地表比辐射率; τ 是大气透射率; T_o 是近地面大气温度。大多数情况下,各地方气象观测站均有相应的实时观测数据,如果缺少实时观测数据,大气透射率和大气平均作用温度可以根据近地面大气湿度和平均气温获取^[8]。地表比辐射率与地表构成有关,可根据相关公式计算获得。

2.2 普适性单通道算法

2003年,Jiménez-Munoz 和 Sobrino 提出了另一种适用于一个热红外波段反演地表温度的算法^[3]。该方法与覃志豪等的单窗算法相比更为简化,仅需要地表比辐射率和大气水汽含量两个参数,计算公式为:

$$T_s = \gamma[\varepsilon^{-1}(\psi_1 L_{\text{sensor}} + \psi_2) + \psi_3] + \delta \quad (5)$$

式中, L_{sensor} 是传感器接收的辐射亮度(W·m⁻²·sr⁻¹·μm⁻¹); ε 是地表比辐射率; ψ_1, ψ_2 和 ψ_3 为大气函数,可由大气水汽含量(w)计算获得;中间变量 γ 和 δ 可由公式(6)、(7)提取:

$$\gamma = \left\{ \frac{C_2 L_{\text{sensor}}}{T_{\text{sensor}}^2} \left[\frac{\lambda^4}{C_1} L_{\text{sensor}} + \lambda^{-1} \right] \right\}^{-1} \quad (6)$$

$$\delta = -\gamma L_{\text{sensor}} + T_{\text{sensor}} \quad (7)$$

$$\psi_1 = 0.014714w^2 - 0.15583w + 1.1234 \quad (8)$$

$$\psi_2 = -1.1836w^2 - 0.37607w - 0.52894 \quad (9)$$

$$\psi_3 = -0.04554w^2 + 1.8719w - 0.39071 \quad (10)$$

式中, T_{sensor} 是传感器亮温; λ 是热红外波段的有效波长11.457 μm; $C_1 = 1.19104356 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, $C_2 = 14\,387.685 \mu\text{mk}$ 。

2.3 地表比辐射率的计算方法

地表比辐射率是地表温度反演过程中消除大气影响的重要参数。单窗算法和普适性单通道算法均

涉及地表比辐射率的计算,文中通过地表构成类型计算地表比辐射率。在实际应用中将研究区像元分为水体、自然表面和城镇三类^[9],水体在热红外波段范围内的比辐射率很高,接近黑体,因此水体像元可以直接赋值为 0.995;其余像元则视为城镇像元或自然表面的混合像元,这两类地表构成类型的比辐射率,计算公式为:

自然表面像元

$$\epsilon_{surface} = P_v R_v \epsilon_v + (1 - P_v) R_s \epsilon_s + d\epsilon \tag{11}$$

城镇像元

$$\epsilon_{built-up} = P_v R_v \epsilon_v + (1 - P_v) R_m \epsilon_m + d\epsilon \tag{12}$$

式中, $\epsilon_v, \epsilon_s, \epsilon_m$ 分别是植被、裸土和建筑物表面的比辐射率; R_v, R_s, R_m 分别为植被、裸土和建筑物表面的温度比率; $d\epsilon$ 为比辐射率修正项,当地表平坦时, $d\epsilon$ 可忽略不计; P_v 是植被占混合像元的比例,一般是通过归一植被指数(NDVI) 获得,计算公式为:

$$P_v = [(NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})]^2 \tag{13}$$

式中, $NDVI_{max}, NDVI_{min}$ 分别是研究区内 NDVI 的最大值和最小值,NDVI 对土壤背景较为敏感,在高植被覆盖区容易饱和。因此,研究中采用改进型土壤调整植被指数(Modified Soil - Adjusted Vegetation Index, MSAVI) 代替 NDVI 计算 P_v 。MSAVI 在高植被覆盖区不易饱和,通过解释背景的光学特征变化修正 NDVI 对土壤背景的敏感性^[10]。MSAVI 的计算公式为:

$$P_v = [(MSAVI - MSAVI_{min}) / (MSAVI_{max} - MSAVI_{min})]^2 \tag{14}$$

$$MSAVI = [(2\rho_{NIR} + 1) - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_R)}] / 2 \tag{15}$$

式中, $MSAVI_{max}, MSAVI_{min}$ 分别是研究区内 MSAVI 的最大值和最小值; ρ_{NIR}, ρ_R 分别为 ETM⁺ 近红外波段和红色波段的反射率。

3 结果与分析

3.1 结果验证

MODIS 温度产品包括了各种地表类型的温度,反演精度一般小于 1 k。Wan 等经过实地验证发现,MODIS 温度产品在均质区的反演精度可以达到 0.5 k 以下^[11]。通过两种算法的反演结果(LST) 与 MODIS LST 的相关性分析,得出经 MSAVI 修正的单窗算法和普适性单通道算法的反演结果与 MODIS LST 的相关系数分别是 0.9255 和 0.8651(图 1),而未经 MSAVI 修正的两种算法的反演结果与 MODIS LST 的相关系数分别是 0.8198 和 0.8017(图 2),说明经 MSAVI 修正获得的 LST 与 MODIS LST 具有更高的相关性,MSAVI 较好地消除了土壤背景对植被指数的影响,增加了地表比辐射率的准确性,提高了地表温度的反演精度;另外,同等条件下,单窗算法的反演结果与 MODIS LST 的相关性均高于普适性单通道算法,说明单窗算法的反演精度高于普适性单通道算法。

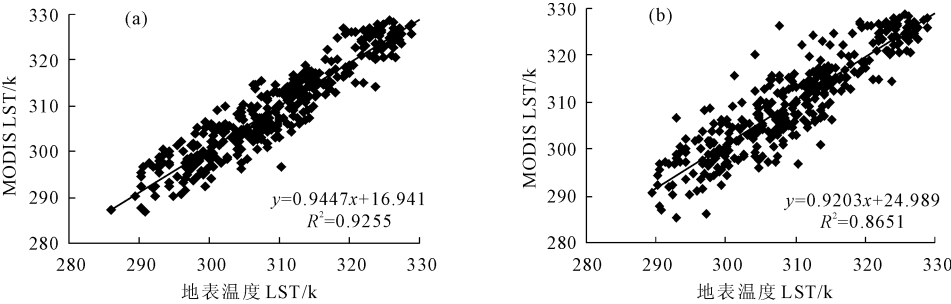


图 1 MSAVI 修正的反演结果与 MODIS LST 的对比(a.单窗算法 b.普适性单通道算法)

Fig.1 Retrieval results adjusted by MSAVI compared with MODIS LST (a. mono-window algorithm; b. single-channel algorithm)

由于两景影像的空间分辨率和成像时间不同,传感器接收的地表辐射强度发生了变化,反演算法所要的参数均是通过经验公式估算获得,对实时大气状况缺少考虑等因素的影响,使两种算法的反演结果与 MODIS LST 出现了差异。单窗算法计算所需的参数是地表比辐射率、大气平均温度和大气透过率,普适性单通道算法所需的参数是地表比辐射率和大气含水量。单窗算法中大气透过率是通过大气含水量计算获得,因此地表比辐射率和大气含水量

对两种算法具有共同的影响,大气平均作用温度是卫星过境时获取的近地面气温数据,减小了经验值造成的误差,提高了单窗算法的反演精度。

3.2 结果分析

3.2.1 反演结果的整体分析 两种算法反演的地表温度空间分布基本相同,变化幅度差异较大,单窗算法反演结果的变化范围是 280.8 ~ 327.0 k,均值为 302.59 k;普适性单通道算法反演结果的变化范围是 275.6 ~ 335.0 k,均值为 304.61 k,单窗算法反

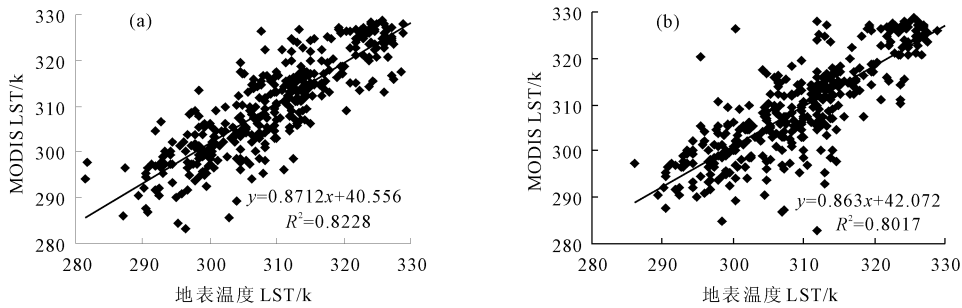


图 2 反演结果与 MODIS LST 的对比(a.单窗算法 b.普适性单通道算法)

Fig.2 Retrieval results compared with MODIS LST (a. mono-window algorithm; b. single-channel algorithm)

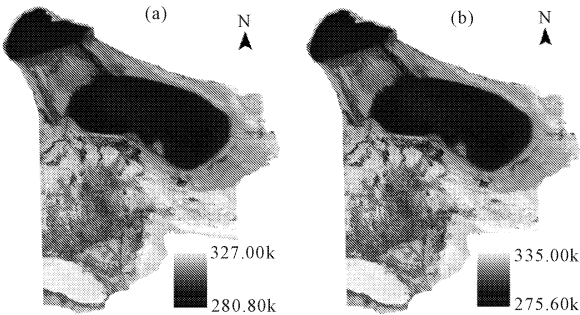


图 3 反演结果(a.单窗算法 b.普适性单通道算法)

Fig.3 Retrieval results (a. mono-window algorithm; b. single-channel algorithm)

演结果的变化幅度和均值小于普适性单通道算法(图 3)。通过对两种算法反演的地表温度(LST)与土壤调整植被指数(MSAVI)相关分析,得出单窗算法和普适性单通道算法的反演结果 LST 与 MSAVI 呈负相关,相关系数分别是 0.8544 和 0.8061,说明地表植被覆盖度直接影响地表温度的变化,MSAVI 值越大地表温度越低,反之则越高(图 4)。因此,研究区内地表植被覆盖区的温度明显低于地表裸露区域温度,这主要是因为地表植被的蒸腾作用加快了地面和大气之间的热量交换,降低了地表温度。

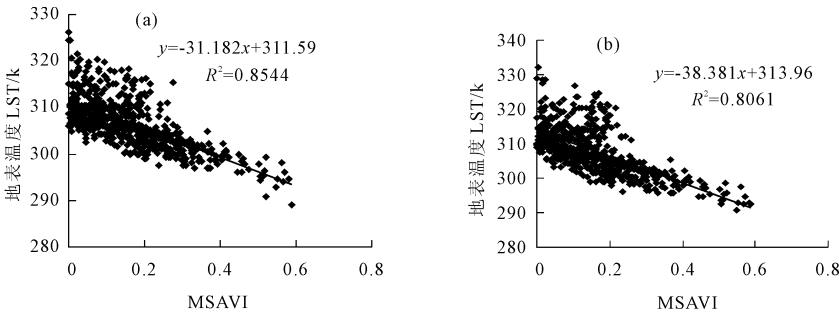


图 4 地表温度(LST)与 MSAVI 的相关分析(a.单窗算法 b.普适性单通道算法)

Fig.4 Correlation analysis between LST and MSAVI (a. mono-window algorithm; b. single-channel algorithm)

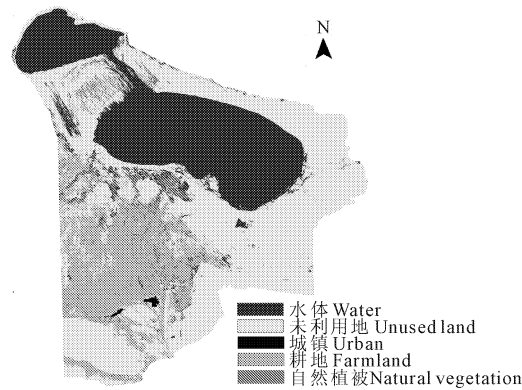


图 5 研究区土地覆盖分类

Fig.5 Map of land-use cover classification in the research area

3.2.2 反演结果的局域分析 单窗算法和普适性

单通道算法的反演结果整体分布相似,局部差异显著。为了进一步揭示两种算法反演结果的差异,将研究区划分为水体、自然植被、耕地、城镇和未利用地 5 种土地覆盖类型(图 4),分别提取两种算法反演结果的最大值、最小值、均值以及与 MODIS LST 的相对误差(表 1)。通过对不同土地覆盖类型两种算法反演结果进行比较分析,得出两种算法的反演结果在水体 LST 最低,整个研究区内地表裸露的未利用地 LST 最高,这与实际情况相符;水体、未利用地和自然植被区域两种算法的反演结果与 MODIS LST 的相对误差均较小,城镇区域单窗算法的反演结果与 MODIS LST 相对误差大于普适性单通道算法,相对误差分别是 4.78% 和 4.23%,说明普适性单通道

算法在城镇区域的反演精度大于单窗算法。为了更加清晰地反映城镇区域两种算法反演结果的差异,利用 MSAVI 与城镇区域 LST 进行相关性分析(图 6),得到 MSAVI 与普适性单通道算法的反演结果的

相关系数为 0.8136,与单窗算法反演结果的相关系数为 0.7857,普适性单通道算法的反演结果与 MSAVI 的相关系数大于单窗算法,表明该算法更适合城镇地表温度的反演。

表 1 不同土地覆盖类型反演结果比较
Table 1 Comparison of retrieval results of different land-use types

土地 利用类型 Land-use type	单窗算法 Mono-window algorithm				普适性单通道算法 Single-channel algorithm			
	最小值/k Min.	最大值/k Max.	均值/k Average	相对误差/% Relative error	最小值/k Min.	最大值/k Max.	均值/k Average	相对误差/% Relative error
水体 Water	280.80	302.19	284.06	0.20	275.60	302.44	283.85	0.24
自然植被 Natural vegetation	285.12	309.77	296.20	1.06	289.80	322.88	295.64	1.17
耕地 Farmland	294.61	315.84	302.65	2.84	294.34	320.08	302.44	2.92
城镇 Urban	296.07	320.41	313.9	4.78	300.58	326.71	314.39	4.23
未利用地 Unused land	298.76	327.00	317.16	0.42	300.19	335.00	317.60	0.56

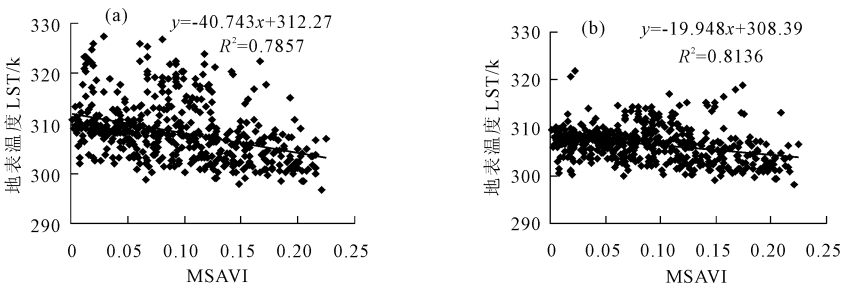


图 6 城镇地表温度与 MSAVI 相关分析(a.单窗算法 b.普适性单通道算法)

Fig.6 Correlation analysis between LST and MSAVI in urban areas (a. mono-window algorithm; b. single-channel algorithm)

4 结 论

本文运用单窗算法和普适性单通道算法分别对 ETM+ 热红外数据进行地表温度反演,在缺少实测验证数据的情况下,通过 MODIS LST 验证,得出以下结论:

- 1) 在地表温度反演过程中,考虑到干旱区植被覆盖率较低,采用 MSAVI 代替 NDVI 计算地表比辐射率,降低土壤背景对植被指数的影响,从而对两种反演算法进行修正,利用修正前后的结果,对比分析表明,修正后的算法提高了反演精度,对该区地表温度的反演效果更好。
- 2) 同等条件下,单窗算法和普适性单通道算法的反演结果经 MODIS LST 验证,表明两种算法均能较好地反演地表温度,单窗算法的反演精度高于普适性单通道算法;不同土地覆盖类型,在城镇区域普适性单通道算法的反演精度略高于单窗算法,说明该方法更适合大范围城镇地表温度的反演研究。

参 考 文 献:

[1] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J].

Journal of Geophysical Research,2003,108(22):1-9.
[2] 覃志豪,Zhang Minghua, Amon Karnieli,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):456-466.
[3] Sobrino J A, Jiménez - Muñoz J C, Leonardo Paolini. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5[J]. Remote Sensing of Environment,2004,90(4):434-440.
[4] 孟宪红,吕世华,张宇.使用 LANDSAT-5TM 数据反演金塔地表温度[J].高原气象,2005,24(5):721-726.
[5] 黄妙芬,邢旭峰,王培娟.利用 LANDSAT/TM 热红外通道反演地表温度的三种方法比较[J].干旱区地理,2006,29(1):132-137.
[6] 白洁,刘绍民,扈光.针对 TM/ETM+ 遥感数据的地表温度反演与验证[J].农业工程学报,2008,24(9):148-154.
[7] 何报寅,丁超,杨小琴,等.Landsat ETM+ SLC - OFF 数据的修复及其在武汉东湖水质反演中的应用[J].长江流域资源与环境,2001,(1):90-95.
[8] 覃志豪, Li Wenjuan, Zhang Minghua,等.单窗算法的大气参数估计方法[J].国土资源遥感,2003,56(2):37-43.
[9] 覃志豪,李文娟,徐斌,等.陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J].国土资源遥感,2004,61(2):28-36.
[10] Qi J, Huete A R. Interpretation of vegetation indices derived from multi-temporal SPOT images[J]. Remote Sensing of Environment, 1993,89(44):89-90.
[11] Wan Z, Zhang Y, Zhang Q. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature[J]. Remote Sensing, 2004, 25(1):261-274.