

单窗算法结合 Landsat 8 热红外数据反演地表温度

胡德勇¹, 乔琨¹, 王兴玲², 赵利民³, 季国华¹

1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048;

2. 民政部国家减灾中心, 北京 100025;

3. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101

摘要: Landsat 热红外系列数据一直是地表温度反演重要的遥感数据源, 目前用于地表温度反演的单窗算法主要针对 Landsat TM/ETM+ 第 6 波段数据(TM 6)建立的, Landsat 8 热红外传感器(TIRS)与 TM 6 相比有很多变化, 因而其单窗算法也需要改进。本文以 Landsat 8 TIRS 第 10 波段(TIRS 10)为数据源, 提出了针对 TIRS 10 的单窗算法(TIRS10_SC), 并对研究区地表温度进行反演研究, 确定了研究区不同类型地表的温度值。研究结果表明: (1) TIRS10_SC 算法可以较好地应用于 Landsat 8 数据的地表温度反演, 平均反演误差为 0.83 °C, 相关系数为 0.805, 反演温度与模拟数据和实测数据都具有较好的一致性; (2) 通过对单窗算法中的地表发射率、大气水汽含量和大气平均作用温度等参数敏感性分析发现, TIRS10_SC 算法能够获得较为可靠的反演结果; 同时, TIRS10_SC 算法对大气水汽含量和地表发射率敏感性较高, 对大气平均作用温度敏感性稍弱。该算法对于利用 Landsat 8 TIRS 数据快速反演地表温度具有应用价值。

关键词: 热红外遥感, 地表温度反演, 单窗算法, Landsat 8 TIRS, MODIS

中图分类号: TP79

文献标志码: A

引用格式: 胡德勇, 乔琨, 王兴玲, 赵利民, 季国华. 2015. 单窗算法结合 Landsat 8 热红外数据反演地表温度. 遥感学报, 19(6): 964-976

Hu D Y, Qiao K, Wang X L, Zhao L M and Ji G H. 2015. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared data using mono-window algorithm. *Journal of Remote Sensing*, 19(6): 964-976 [DOI: 10.11834/jrs.20155038]

1 引言

地表温度是常见的地表生物物理参量之一, 在城市热环境、地表辐射能量平衡、全球气候变化等应用领域都有重要研究价值。热红外遥感探测技术能够获取地表热红外谱段的辐射能量, 并基于地表物体的发射率特性反演其热力学温度, 因而成为了获取大区域温度值及其时空分布特征的重要途径(覃志豪等, 2005; Sobrino等, 2005; 宋挺等, 2015)。

目前地表温度的遥感反演算法包括辐射传输方程法(Sobrino等, 2004; Li等, 2004; 毛克彪等, 2007)、单窗算法(Qin等, 2001; Jiménez-Muñoz和Sobrino, 2003; 周纪等, 2011)、分裂窗算法(Wan和

Dozier, 1996; Ri等, 2013)以及多通道多角度算法(Sobrino等, 1996; Gillespie等, 1998; 毛克彪等, 2006)等, 不同的算法适用于不同的遥感传感器的热红外数据(罗菊花等, 2010)。Landsat 卫星的热红外系列数据一直是地表温度反演最重要的遥感数据之一, 从 Landsat TM、Landsat ETM+、到 2013 年 3 月发射成功的 Landsat 8 热红外传感器 TIRS(Thermal Infrared Sensor), Landsat 为遥感用户提供了可供长期、连续观测的热红外遥感图像。对于最新的 Landsat 8 TIRS 数据, 已有研究者通过正演模拟方法构建模拟数据开展了 TIRS 数据地表温度反演算法研究, 如 Jiménez-Muñoz 等人(2014)对单通道算法和分裂窗算法的反演精度和敏感性进行了对比分析, 结果表明随着大气水汽含量的增加, 分裂窗

收稿日期: 2015-03-17; 修订日期: 2015-06-19; 优先数字出版日期: 2015-06-26

基金项目: 国防科工局民用航天“十二五”预研项目(编号: D030101)

第一作者简介: 胡德勇(1974—)男, 副教授, 主要研究领域为资源环境遥感、自然灾害遥感监测与评估。E-mail: deyonghu@163.com

通信作者简介: 乔琨(1989—)女, 硕士, 主要从事环境遥感研究。E-mail: qiaoyingying2009@126.com

算法的精度略高于单通道算法; Rozenstein 等 (2014) 探讨了分裂窗算法反演地表温度的可行性以及相关参数的敏感性; Yu 等 (2014) 对辐射传输方程法、分裂窗算法以及单通道算法 3 种算法的反演精度进行了定量对比分析, 结果表明辐射传输方程法精度最高, 其次是分裂窗算法、单通道算法。但是, 上述提到的研究都是基于模拟数据集, 没有涉及到 Landsat 8 TIRS 图像; 另外, 美国地质调查局 USGS (United States Geological Survey) 指出由于 Landsat 8 卫星刚发射运行不久, TIRS 第 11 波段暂时存在定标不稳定性, 因而不建议运用分裂窗算法进行定量研究, 如分裂窗算法反演地表温度以及大气校正等 (USGS, 2014), 故本文主要针对 Landsat 8 TIRS 10 数据讨论其单窗算法。

单窗算法能够将大气和地表的影响直接包括在演算公式内, 与辐射传输方程法相比简单易行、应用方便, 能够适用于 Landsat 数据长时间序列的地表温度反演研究。国内外很多学者已经针对 Landsat 系列卫星热红外遥感数据的地表温度反演的单窗算法开展了大量研究, 主要有 Jiménez-Muñoz 单通道算法 (简称为 JM_SC) 和覃志豪单窗算法 (简称为 Qin_SC)。JM_SC 分析了大气水汽含量和大气透过率、大气上行辐射和大气下行辐射等 3 参量之间的关系, 提出了采用大气水汽含量值来量化该 3 个参量的方法, 因而在确知地表发射率情况下, 将单通道算法表达为以大气水汽含量为变量的函数 (Jiménez-Muñoz 和 Sobrino, 2003); Qin_SC 分析了大气平均作用温度和大气上行辐射和大气下行辐射等 2 参量之间的关系, 将单窗算法表达为大气透过率和大气平均作用温度的函数 (Qin 等, 2001)。目前, 针对 Landsat 8 TIRS 图像反演地表温度的单窗算法研究的文献还未能发现, 故本文以 Landsat 8 TIRS 10 遥感图像反演地表温度为目标, 提出针对 TIRS 10 的单窗算法。

Landsat 8 TIRS 包括两个热红外波段, 第 10 波段 (10.60—11.19 μm) 和第 11 波段 (11.50—12.51 μm), TIRS 10 位于较低的大气吸收区, 其大气透过率值高于 TIRS 11, 更适用于单波段的地表温度反演 (Jiménez-Muñoz 等, 2014; Yu 等, 2014)。与 Landsat TM 6 相比, Landsat 8 TIRS 10 的波段范围变窄, 光谱响应函数也发生了变化 (如图 1 所示), 因而其单窗算法需要针对其光谱特性开展具体分析和改进。本文综合 TIRS 10 特性和热辐射传输方程, 建模地表温度和亮温、大气平均作用温度、

大气透过率和地表发射率等参数之间的关系, 提出了针对 TIRS 10 的单窗算法; 利用 Landsat 8 图像和其他辅助数据完成了研究区的地表温度反演及其结果精度验证, 并讨论了算法中相关变量的敏感性。

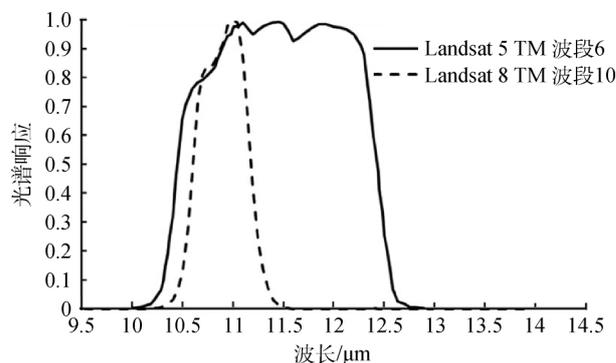


图1 Landsat 5 第 6 波段与 Landsat 8 第 10 波段光谱响应函数

Fig. 1 Spectral response function for Landsat 5 and Landsat 8 thermal bands

2 原理和方法

2.1 TIRS 接收到的辐射能量

地表热辐射传输方程是遥感反演地表温度的基础。Landsat 8 卫星 TIRS 接收到的辐射通量主要包括地表热辐射、大气上行热辐射以及大气下行热辐射被地表反射回传感器部分:

$$L_i(T_i) = \tau_i \varepsilon_i L_B(T_s) + \tau_i (1 - \varepsilon_i) L_i \downarrow + L_i \uparrow \quad (1)$$

式中, T_i , T_s 分别代表亮温和地表温度 (K); i 代表 TIRS 波段; $L_i(T_i)$ 为亮温为 T_i 时传感器接收到的辐射能量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); $L_B(T_s)$ 为地表温度为 T_s 时的辐射能量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); τ_i 为大气透过率 (无量纲); ε_i 代表地表发射率 (无量纲); $L_i \downarrow$ 为大气下行辐射 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); $L_i \uparrow$ 为大气上行辐射 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)。

通过数学积分简化 $L_i \uparrow$ 和 $L_i \downarrow$ 可近似为 (覃志豪 2001):

$$\begin{cases} L_i \uparrow \approx (1 - \tau_i) L_B(T_a) \\ L_i \downarrow \approx (1 - \tau_i) L_B(T_a \downarrow) \end{cases} \quad (2)$$

式中, T_a 和 $T_a \downarrow$ 分别表示大气向上和向下的平均作用温度 (K); $L_B(T_a)$ 为大气温度为 T_a 时的大气向上辐射能量; $L_B(T_a \downarrow)$ 为大气温度为 $T_a \downarrow$ 时的大气向下辐射能量。研究表明用 T_a 代替 $T_a \downarrow$ 对求解地表温度产生的影响可以忽略不计, 则 $L_B(T_a)$ 可以代替

$L_B(T_a \downarrow)$ 进行计算(Qin 等, 2001)。下文中大气平均作用温度均由 T_a 表示。

将式(2)代入式(1), 则 Landsat 8 第 10 波段(TIRS 10)接收到的辐射能量可简化为:

$$L_{10}(T_{10}) = \tau_{10} \varepsilon_{10} L_B(T_s) + (1 - \tau_{10}) [1 + (1 - \varepsilon_{10}) \tau_{10}] L_B(T_a) \quad (3)$$

式中 τ_{10} 为 TIRS 10 的大气透过率; ε_{10} 为 TIRS 10 的地表发射率。

2.2 针对 TIRS 10 的单窗算法

根据普朗克黑体辐射理论, 物体的辐射能量与温度和波长的关系为:

$$L_B(T_j) = 2hc^2 / [\lambda_{10}^5 \cdot (e^{hc/\lambda_{10}kT_j} - 1)] \quad (4)$$

式中 $L_B(T_j)$ 为温度为 T_j 时的辐射能量; 当 j 为 10 时, T_j 代表 TIRS 10 的亮温; 当 j 为 s 时, T_j 代表地表温度(K); 当 j 为 a 时, T_j 代表大气平均作用温度(K); h 为普朗克常数 ($h = 6.6261 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$); c 为真空中的光速 ($c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); k 为玻尔兹曼常数 ($k = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$); λ_{10} 为 Landsat 8 TIRS 10 的有效波长 (μm), 可由下式求得:

$$\lambda_{10} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) \lambda d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

式中 $f(\lambda)$ 为 TIRS 10 的光谱响应函数, λ_1 和 λ_2 分别为 TIRS 10 波段范围的最小值和最大值。

TIRS 10 波段范围及其光谱响应函数如图 1 所示, 由式(5)求得 $\lambda_{10} = 10.90 \mu\text{m}$, 此时式(4)可简化为 $L_B(T_j) = K_1 / (e^{K_2/T_j} - 1)$ 。 K_1 、 K_2 为常数, 分别为 $774.89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 和 1321.08 K 。式(4)的泰勒展开可表示为:

$$L_B(T_j) = L_B(T) + (T_j - T) \partial L_B(T) / \partial T + \delta = (Q + T_j - T) \partial L_B(T) / \partial T \quad (6)$$

式中 $Q = [L_B(T) + \delta] / [\partial L_B(T) / \partial T]$ 。 $L_B(T)$ 为温度为 T 时的辐射能量; Q 为温度参数; T 为某一固定的温度; δ 为一阶泰勒展开余项; $\partial L_B(T) / \partial T$ 为辐射函数对温度 T 求偏导。

通常情况下, 由于存在 $T_a < T_{10} < T_s$ 关系, 该 T 可以设置为 T_{10} (Qin 等, 2001), 则有:

$$Q = T_{10}^2 (e^{K_2/T_{10}} - 1) / (K_2 e^{K_2/T_{10}}) + \Delta Q \quad (7)$$

式中, T_{10} 代表 TIRS 10 的亮温; ΔQ 为泰勒展开余项 δ 带来的温度参数增量; K_2 为常数 1321.08。

当亮温较低时, 式(7)可近似为 T_{10}^2 / K_2 , 将其和式(4)、(6)一并代入式(3), 可推导出针对 TIRS 10 的单窗算法(简称为 TIRS10_SC):

$$T_s = [K_2(\varphi_1 + \varphi_2) T_{10} + (1 - \varphi_1 - \varphi_2) T_{10}^2 - K_2 \varphi_2 T_a] / K_2 \varphi_1 \quad (8)$$

式中 $\varphi_1 = \varepsilon_{10} \tau_{10}$ 、 $\varphi_2 = (1 - \tau_{10}) [1 + (1 - \varepsilon_{10}) \tau_{10}]$ 。 T_{10} 为 TIRS 10 的亮温; T_a 为大气平均作用温度(K); K_2 为常数 1321.08。

3 研究区和数据

3.1 研究区

研究区位于河南省郑州市郊区的上街机场及其附近区域, 位于地理坐标 $113^\circ 15' 41'' \text{ E} - 113^\circ 17' 20'' \text{ E}$, $34^\circ 50' 06'' \text{ N} - 34^\circ 50' 52'' \text{ N}$ 的区域范围内。研究区内地势平坦, 平均海拔在 133—139 m, 主要土地覆被类型为建设用地、耕地、裸土等, 如图 2 所示。

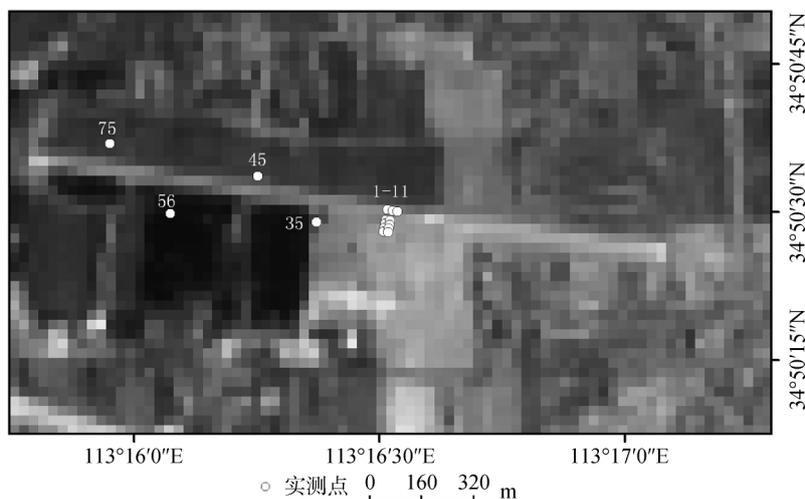


图 2 研究区 Landsat 8 图像以及地面实测点位置示意图

Fig. 2 Location of study area and observation sites

3.2 数据

(1) 遥感数据及其预处理

选取同一天覆盖研究区的 Landsat 8 OLI、TIRS 数据和 MODIS L1B Calibrated Reflectance 产品, 遥感数据详细情况见表 1。Landsat 8 OLI 数据主要用于估算研究区的地表发射率, MODIS 数据主要用于估算研究区的大气水汽含量, TIRS 数据用于反演地表温度。

表 1 遥感数据来源及相关参数
Table 1 Relevant parameters of remote sensing data

相关参数	数据源	
	Landsat 8 OLI 和 TIRS	MODIS L1B
空间分辨率	30 m(多光谱波段)	250 m(第 2 波段)
	100 m(热红外波段)	1 km(第 19 波段)
成像时间	2014-05-22 T 11:00:47	2014-05-22 T 10:30

数据预处理包括几何校正、辐射定标和大气校正等。首先对 MODIS 数据进行几何校正以及重投影; 然后对 Landsat 8 OLI 数据的第 4、5 波段进行辐射定标, 将 DN 值转换为表观辐射亮度, 再对其进行大气校正, 得到地表反射率; 最后将 MODIS 影像和 Landsat 8 数据进行配准, 并将 MODIS 影像重采样。预处理后图像的地图投影为 UTM, 地图坐标系为 WGS-84, 图像分辨率为 30 m。

(2) 实测数据

由于地表温度随时间变化较快, 地面实测采用集成热电偶的无线传感器网络(WSN)技术来获取不同地物类型的表面温度。对于裸土和水泥地面测温, 直接将 WSN 设备放置在裸土和水泥地面上方, 紧贴地表; 对于稀疏植被测温, 将 WSN 设备捆绑在植被叶片上, 紧贴植被叶片表层。该 WSN 设备的测温范围为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$, 数据输出频率为 1 分钟 1 次。根据下垫面类型从研究区内选取了 15 个实测点, 分别位于研究区机场跑道及其两侧, 编号为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、35、45、56 和 75, 各实测点的空间分布如上图 2 所示, 其中实测点 35、45、56 和 75 下垫面为稀疏植被, 实测点 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 和 11 下垫面分别为裸土和水泥地面。

4 单窗算法参数的量化

4.1 大气透过率的遥感反演

TIRS 10 的大气透过率主要取决于大气水汽含

量值, 其他影响因子如 CO_2 、 O_3 等气体在一景图像所覆盖范围中可视为不变 (Rozenstein 等, 2014)。可用 MODTRAN 模拟出大气透过率与大气水汽含量的关系, 建立大气透过率与大气水汽含量之间的回归方程, 再将大气水汽含量作为输入因子推算出大气透过率 (毛克彪 等, 2005)。

(1) 大气透过率与大气水汽含量之间关系

运用 MODTRAN 模拟了 Landsat 8 TIRS 10 的大气透过率和大气水汽含量之间的关系。假定大气水汽含量由 0.4 g/cm^2 增加到 6 g/cm^2 , 分析不同水汽含量条件下的大气透过率, 如图 3 所示。

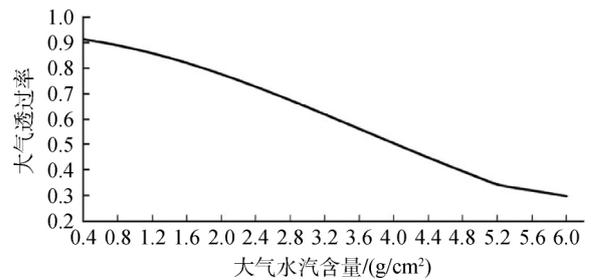


图 3 TIRS 第 10 波段大气透过率随大气水汽含量的变化

Fig. 3 Variation of atmospheric transmittance with atmospheric water vapor content for TIRS band 10

为了获得更加精确的大气透过率和大气水汽含量之间关系的拟合方程, 将大气水汽含量的范围分为 $0.4\text{—}3.0\text{ g/cm}^2$ 和 $3.0\text{—}6.0\text{ g/cm}^2$ 两段进行拟合, 结果如表 2 所示。

表 2 TIRS 第 10 波段大气水汽含量与大气透过率关系式的拟合结果

Table 2 Piecewise relationships of atmospheric transmittance and atmospheric water vapor content for TIRS band 10

大气水汽含量范围/(g/cm^2)	拟合方程	R^2	RMSE
0.4—3.0	$\tau = -0.0177w^2 - 0.0435w + 0.9347$	0.9999	0.0009
3.0—6.0	$\tau = 0.0176w^2 - 0.2804w + 1.3374$	0.9972	0.0061

根据研究区当时具体大气状况, 本文采用大气水汽含量范围 $0.4\text{—}3.0\text{ g/cm}^2$ 的拟合方程。

(2) 大气水汽含量的遥感反演

MODIS 包含 36 个波段, 其中 17、18 和 19 波段为大气吸收波段, 2 和 5 波段为大气窗口波段。运用 MODIS 数据通道比值法反演大气水汽含量, 可以

部分消除地表反射率随波长变化对大气透过率产生的影响,能够提高大气水汽含量的反演精度(Kaufman 和 Gao, 1992; 历华, 2007)。选取 MODIS 第 2 波段和第 19 波段数据,采用初步改进的通道比值法反演大气水汽含量(孟宪红等, 2007):

$$\begin{cases} w = (\alpha - \ln\tau_w/\beta)^2 \\ \tau_w = \rho(19)/\rho(2) \end{cases} \quad (9)$$

式中 w 为大气水汽含量 (g/cm^2); τ_w 为大气透过率; $\rho(19)$ 和 $\rho(2)$ 分别表示 MODIS 数据第 19 波段和第 2 波段的表观反射率; α 和 β 为常数,针对不同的地表类型有不同的取值。

本文将 MODIS 第 19 波段数据重采样至 250 m,结合研究区实际地表类型,采用混合型地表的参数 $\alpha=0.02$ $\beta=0.651$ (Kaufman 和 Gao, 1992)。

4.2 大气平均作用温度的估算

4 种标准大气的大气平均作用温度 T_a 的估算方程(Qin 等, 2001)如表 3 所示,其中 T_0 为近地表温度。

表 3 大气平均作用温度估算方法

Table 3 Equation for estimating the average operation temperature of atmosphere

大气模式	大气平均作用温度估算方程
热带大气	$T_a = 17.9769 + 0.91715 T_0$
中纬度夏季	$T_a = 16.0110 + 0.92621 T_0$
中纬度冬季	$T_a = 19.2704 + 0.91118 T_0$
1976 年美国标准大气	$T_a = 25.9396 + 0.88045 T_0$

本文选择中纬度夏季模式的大气平均作用温度估算公式,将研究区地面观测得到的近地表空气温度代入估算方程来完成 T_a 的量化。

4.3 亮度温度的推算

利用定标系数对图像 DN 值进行辐射定标,将像元的 DN 值转换为大气层上界光谱辐射亮度,之后可用普朗克公式反推星上亮温值,公式如下:

$$T_{10} = K_2 / \ln\left(\frac{K_1}{L_{10}} + 1\right) \quad (10)$$

式中 K_1 、 K_2 为常数 L_{10} 为大气层上界光谱辐射亮度 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)。

4.4 地表发射率的遥感反演

本文选择基于图像分类的计算方法来完成地表发射率的估算。首先将 OLI 数据全色波段(分辨

率为 15 m)与多光谱波段(30 m)进行融合,增强图像的目视解译精度,然后运用监督分类将其分为 3 类:城镇地表(包括道路,各种建筑物和房屋),自然地表(包括天然陆地表面,林地和农田)和裸土, Sobrino(Sobrino 等, 2001)和 Stathopoulou(Stathopoulou 等, 2007)等研究得出建筑物表面、植被、裸土等纯净像元的地表发射率分别为 0.970、0.986 和 0.972,城镇地表可以视为建筑物和绿化植被组成的混合像元,同样自然地表可以视为植被叶冠和裸土组成的混合像元,这两类混合像元的地表发射率可由以下公式表达:

$$\begin{cases} \varepsilon = P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_v) R_m \varepsilon_m + d\varepsilon & (\text{城镇地表}) \\ \varepsilon = P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_v) R_s \varepsilon_s + d\varepsilon & (\text{自然地表}) \end{cases} \quad (11)$$

式中 P_v 是指植被占混合像元的比例, R_v 、 R_m 和 R_s 分别代表植被、建筑物和裸土的温度比率, ε_v 、 ε_m 和 ε_s 分别代表植被、建筑物和裸土纯净像元的地表发射率, $d\varepsilon$ 可以根据植被的构成比例,由下式求得:

$$\begin{cases} d\varepsilon = 0.0038 P_v & P_v \leq 0.5 \\ d\varepsilon = 0.0038(1 - P_v) & P_v > 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

采用基于 NDVI 的像元二分模型来估算植被覆盖度:

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2 \quad (13)$$

式中, $NDVI_s$ 为裸露土壤或者建筑表面的 NDVI 值, $NDVI_v$ 为全植被覆盖区的 NDVI 值。本文根据研究区实际植被覆盖状况将 $NDVI_s$ 设为 0.14, $NDVI_v$ 设为 0.5,当图像像元的 $NDVI > NDVI_v$ 时,则代表全植被覆盖, $P_v = 1$; 当图像像元的 $NDVI < NDVI_s$ 时,则代表裸土, $P_v = 0$,图像像元的 NDVI 值可以通过 Landsat 8 的红光波段和近红外波段求得。

温度比率 R_i 定义为 $R_i = (T_i/T)^4$, 植被 R_v 、建筑物 R_m 和裸土 R_s 的温度比率可由以下公式求得(覃志豪等, 2004):

$$\begin{cases} R_v = 0.9332 + 0.0585 P_v \\ R_m = 0.9886 + 0.1287 P_v \\ R_s = 0.9902 + 0.1068 P_v \end{cases} \quad (14)$$

式中 R_v 、 R_m 、 R_s 分别为植被、建筑物和裸土的温度比率。

5 地表温度反演结果与精度验证

5.1 地表温度反演结果

基于亮温、大气平均作用温度、大气透过率和

地表发射率的估算结果,采用 TIRS10_SC 算法对研究区的地表温度进行计算,结果如图 4 所示。从图上颜色分布可以看出地表温度差异明显,其最高值为 32.25 °C,最低值为 10.72 °C;机场跑道、水泥路

面、建筑物等人工地表的温度明显高于其外围植被覆盖区(主要土地利用类型为耕地、荒草地等),前者地表温度约介于 24.12—32.25 °C,后者地表温度约介于 10.72—19.79 °C。

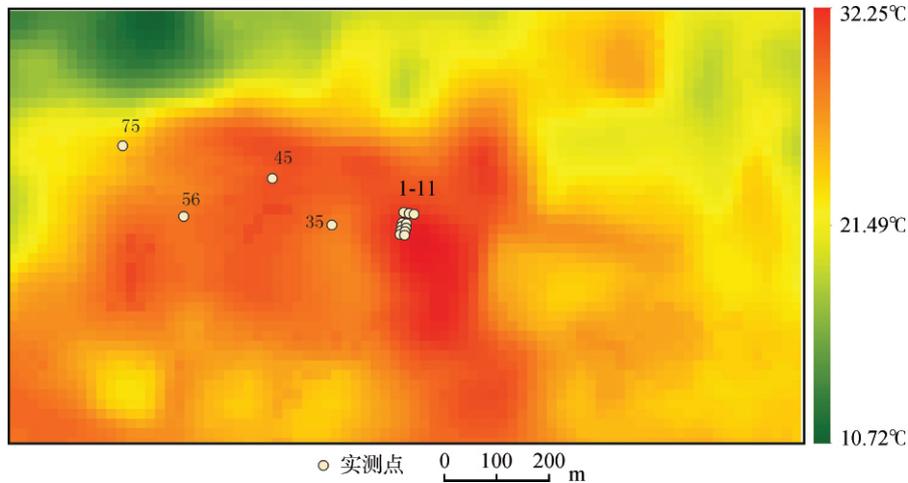


图 4 地表温度反演结果及实测点位置图

Fig. 4 Retrieval result of land surface temperature and the location of observation sites

5.2 精度验证

验证反演地表温度结果精度最直接的方法是用地表观测温度数据与其对比;除此之外,模拟数据也可以用于反演结果的精度验证(Qin 等, 2001; 周纪 等, 2011)。利用大气辐射传输模型可以模拟在指定地表温度、指定大气廓线等条件下卫星传感器接收到的辐射亮度、大气透过率等数据,再运用普朗克公式将辐射亮度转换为亮温,最后再将各参数代入地表温度反演式(8),计算各指定条件下的地表温度反演值。对比初始设置的地表温度和单窗算法反演结果,可以验证该算法的反演精度。本文采用上述两法对单窗算法式(8)反演的地表温度进行精度验证。

(1) 基于模拟数据的精度验证

根据研究区的实际情况,Landsat 8 卫星过境时间为地方时上午 11:00 点左右,此时研究区地面温度大都低于 40 °C,因此设定 5 种地表温度条件,分别为 20 °C、25 °C、30 °C、35 °C 和 40 °C;结合遥感数据反演得到的研究区的大气水汽含量值,设定 3 种大气水汽含量,分别为 2.0 g/cm²、2.5 g/cm² 和 3.0 g/cm²;再依据研究区的地物地表发射率的变化范围 0.963—0.985,将地表发射率设定为 0.974;选用中纬度夏季大气廓线,用 MODTRAN 模拟得到各条件下的热辐射亮度和大气透过率。模拟参数结

果和地表温度值差值(误差)等如表 4 所示。

由表 4 可以看出,本文算法有着较好的反演精度,在多数情况下误差为 0.2—0.3 °C 左右;地表温度为 40 °C,大气水汽含量为 3.0 g/cm² 时,最大反演误差为 0.396 °C,

(2) 基于实测数据的精度验证

运用实测数据对模型反演的地表温度进行分析,虽然点实测数据不能完全代表像元尺度的地表温度,但可以作为反演结果精度检验的间接指标,验证结果如表 5。

由表 5 可以看出,反演结果的最小误差为 0.01 °C,最大误差为 3.23 °C;裸土和水泥下垫面平均误差为 0.60 °C,稀疏植被下垫面的平均误差为 1.48 °C,总体平均误差为 0.83 °C。为了进一步定量分析反演精度,我们计算了相关系数以及均方根误差,相关系数为 0.805,且通过了 $\alpha = 0.01$ 的相关系数显著性检验, RMSE 为 1.13 °C。

总体看来,多数检验点的反演结果误差可以控制在 1 °C 以内,但有 4 个检验点误差大于 1 °C,其中 75 号点与实测值存在较大误差,可能由以下几点原因造成:(1) 稀疏植被下垫面的地表温度误差较大是由于其实测点周边地物类型比较复杂、分布不均,在遥感影像上对应为混合像元。地表发射率是根据地物类型赋予的经验值,虽然结合了简单的混合像元分解,但是没有对研究区不同地物类

型的实际发射率进行测量统计,会带来一定的误差;(2) 大气水汽含量是由 MODIS 数据反演得到与实际大气水汽含量相比存在一定误差,从而给

大气透过率估算带来误差;(3) 误差其他来源,如运用手持 GPS 进行实测点定位时会带来一定的定位误差。

表 4 基于 MODTRAN 模拟数据的单窗算法精度检验

Table 4 Validation of the mono-window algorithm based on MODTRAN simulation data

大气水汽含量/ (g/cm ²)	地表温度/°C	热辐射亮度/ (W · m ⁻² · sr ⁻¹ · μm ⁻¹)	大气透过率	反演温度/°C	误差/°C
2.0	20	8.274	0.739	20.125	0.125
	25	8.874	0.748	25.196	0.196
	30	9.506	0.758	30.263	0.263
	35	10.193	0.769	35.243	0.243
	40	10.922	0.780	40.312	0.312
2.5	20	8.229	0.677	20.098	0.098
	25	8.814	0.686	25.226	0.226
	30	9.425	0.697	30.290	0.290
	35	10.102	0.707	35.322	0.322
	40	10.810	0.718	40.346	0.346
3.0	20	8.184	0.610	20.132	0.132
	25	8.748	0.620	25.266	0.266
	30	9.335	0.631	30.316	0.316
	35	9.998	0.641	35.361	0.361
	40	10.690	0.651	40.396	0.396

表 5 反演结果精度检验

Table 5 Comparison between the retrieval results and measured values

下垫面类型	实测点编号	实测地表温度/°C	反演地表温度/°C	误差/°C
裸土和水泥	1	30.56	31.37	0.81
	2	30.55	31.66	1.11
	3	31.43	31.66	0.23
	4	30.81	31.20	0.39
	5	30.59	31.37	0.78
	6	31.16	31.66	0.50
	7	31.12	31.66	0.54
	8	31.10	31.82	0.72
	9	30.71	30.72	0.01
	10	31.07	30.72	-0.35
	11	29.62	30.77	1.15
稀疏植被	35	27.42	27.23	-0.19
	45	28.79	29.52	0.73
	56	29.56	27.79	-1.77
	75	29.18	25.95	-3.23

6 讨论

6.1 温度参数 Q 的敏感性分析

(1) 泰勒展开余项 δ 值的影响

根据式(4),可以看出物体辐射能量值随温度的变化是非线性的,在 $T_a - T_s$ 温度范围较窄条件下,可以将 $L_B(T_s)$ 、 $L_B(T_a)$ 近似为和 $L_B(T_{10})$ 有关的泰勒一次展开式的前两项(即忽略泰勒一次展开式的余项 δ)。如果研究区温差较大,该线性近似可能带来较大误差,分析如下:

将式(7)记为 $Q = Q_{qin} + \Delta Q$,则地表温度反演公式可表示为:

$$T_s = \frac{Q_{qin}(1 - \varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_1 + \varphi_2)T_{10} - \varphi_2 T_a - \Delta Q_{T_s} - \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \Delta Q_{T_a}}{\varphi_1} \quad (15)$$

式中, T_s 为温度反演值; Q_{qin} 为 Qin_SC 算法的温度参数(Qin 等 2001); ΔQ_{T_s} 为温度为 T_s 时泰勒展开余项的影响因子; ΔQ_{T_a} 为温度为 T_a 时泰勒展开余项的影响因子;其他各变量的意义同式(3)、(6)。

假定 T_a 、 T_s 的变化范围为 288—308 K, Q_{qin} 值随亮温的变化如图 5 所示。在 Q_{qin} 值曲线上的散点表示 ΔQ 的可能分布位置,可计算 δ 的变化区间约为 0—0.24, ΔQ 的变化区间约为 0—1.90。

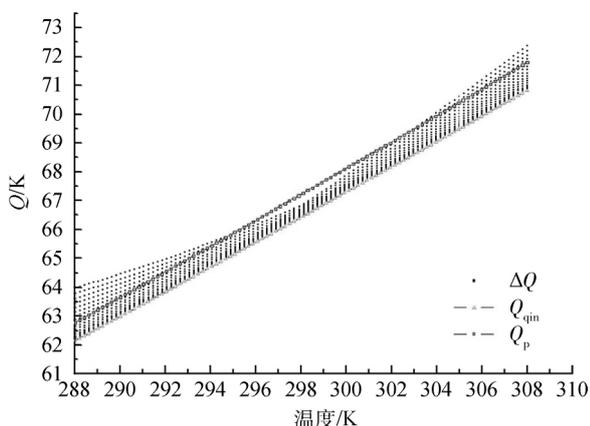


图 5 在 288—308 K 温度范围温度参数 Q_{qin} 、 Q_p 、 ΔQ 变化对比

Fig. 5 Change of the temperature parameter Q_{qin} 、 Q_p 、 Q from 288 K to 308 K

总体说来,由于 T_s 和亮温之间的差距较小,因而舍弃 ΔQ_{T_s} 项只给式(15)带来较小误差,甚至可以忽略;当反演复杂地表覆被类型区域、温度变化区

间较大区域的温度时, T_a 和亮温之间可能存在较大差距,这时 ΔQ_{T_s} 的影响不可忽视。可以看出,本文的极端情况 ΔQ_{T_s} 值可达到约 1.9(譬如亮温和空气平均温度相差 20 °C 的极端情况),此时利用 Qin_SC 算法反演地表温度,其结果比真实温度值要高,其误差可达到 2 °C 以上(即反演值比真实值高出 2 °C 以上)。

(2) TIRS10_SC 算法和 Qin_SC 算法的对比

本文 TIRS10_SC 算法将温度参数近似为 $Q = Q_{qin} + \Delta Q \approx T_{10}^2 / K_2$,近似后的温度参数表示为 Q_p 。 Q_{qin} 、 Q_p 对比如图 5 所示。 Q_p 在 Qin_SC 算法温度参数 Q_{qin} 之上,约高出 Q_{qin} 值 0.5,综合考虑式(15)中 φ_1 、 φ_2 ,可能带来 0.004—0.024 °C 的误差,能够获得可靠的反演结果。

6.2 地表发射率、大气水汽含量和近地面气温的敏感性分析

从式(8)的 TIRS10_SC 算法可以看出,影响地表温度反演结果的变量为 τ_{10} 、 T_a 和 ε_{10} 等 3 个。由于 TIRS 10 的大气透过率主要受大气水汽含量的影响,因而本文 TIRS10_SC 算法的适用性需要讨论大气水汽含量、地表发射率和近地面气温等 3 个要素的敏感性,即估计其量化误差对地表温度反演结果带来的影响。假定某一要素存在较小偏移(参数误差)、其他要素不变或在指定范围内变化,然后分析各要素不同组合情况下,给最终地表温度反演结果带来的变化量(即反演误差)(高懋芳 等 2005; Qin 等 2001):

$$\Delta T_s = |T_s(x + \Delta x) - T_s(x)| \quad (16)$$

式中, ΔT_s 是地表温度的反演误差; Δx 是相关参数误差; $T_s(x + \Delta x)$ 和 $T_s(x)$ 分别为参数值为 $(x + \Delta x)$ 和 x 时反演得到的地表温度。

结合研究区的实际情况,对地表发射率、大气水汽含量以及近地面气温等 3 个参数分别取一定的变动区间进行渐变取值测算: 1) 地表发射率以 Landsat 8 OLI 数据反演得到的结果为基准,考虑误差为 ± 0.01 , ± 0.02 , ± 0.03 和 ± 0.04 共 8 种情况; 2) 大气水汽含量以 MODIS 数据反演得到的结果为基准,考虑误差为 $\pm 0.1 \text{ g/cm}^2$, $\pm 0.2 \text{ g/cm}^2$, $\pm 0.3 \text{ g/cm}^2$ 和 $\pm 0.4 \text{ g/cm}^2$ 共 8 种情况; 3) 近地面气温以当天卫星过境时刻的大气温度(29 °C)为基准,考虑误差上下浮动 5 °C,获得 3 个大气平均作用温度,即 291.09 K(24 °C), 295.73 K(29 °C), 300.36 K(34 °C)。

(1) 地表发射率的敏感性
不同大气水汽含量、不同近地面气温下,地表发射率误差对反演结果的影响如表 6、图 6 所示,其

中 $T_s(e-0.04)$ 表示地表发射率为 $e-0.04$ 时反演得到的地表温度 e 为反演得到的地表发射率,其他命名原则相同。

表 6 相同大气水汽含量和近地面气温条件下地表发射率误差对反演结果的影响
Table 6 Impact of land surface emissivity errors on retrieval result with fixed water vapor content and near-surface temperature

大气水汽含量/ (g/cm ²)	温度结果差值计算 $ T_s(x+\Delta x) - T_s(x) $	差值均值 $\Delta T_s/^\circ\text{C}$		
		近地面气温 24	近地面气温 29	近地面气温 34
<i>w</i>	$ T_s(e-0.04) - T_s(e) $	2.335	2.165	1.995
	$ T_s(e-0.03) - T_s(e) $	1.733	1.607	1.480
	$ T_s(e-0.02) - T_s(e) $	1.143	1.060	0.977
	$ T_s(e-0.01) - T_s(e) $	0.566	0.524	0.483
	$ T_s(e+0.01) - T_s(e) $	0.554	0.514	0.473
	$ T_s(e+0.02) - T_s(e) $	1.097	1.017	0.937
	$ T_s(e+0.03) - T_s(e) $	1.629	1.511	1.392
	$ T_s(e+0.04) - T_s(e) $	2.151	1.994	1.838
<i>w-0.1</i>	$ T_s(e-0.04) - T_s(e) $	2.359	2.198	2.037
	$ T_s(e-0.03) - T_s(e) $	1.75	1.631	1.512
	$ T_s(e-0.02) - T_s(e) $	1.155	1.076	0.997
	$ T_s(e-0.01) - T_s(e) $	0.571	0.532	0.493
	$ T_s(e+0.01) - T_s(e) $	0.560	0.522	0.483
	$ T_s(e+0.02) - T_s(e) $	1.108	1.033	0.957
	$ T_s(e+0.03) - T_s(e) $	1.646	1.534	1.421
	$ T_s(e+0.04) - T_s(e) $	2.173	2.025	1.877

注:表 6 只列出了大气水汽含量为 $w\text{ g/cm}^2$ 和 $w-0.1\text{ g/cm}^2$ 的两种情况。

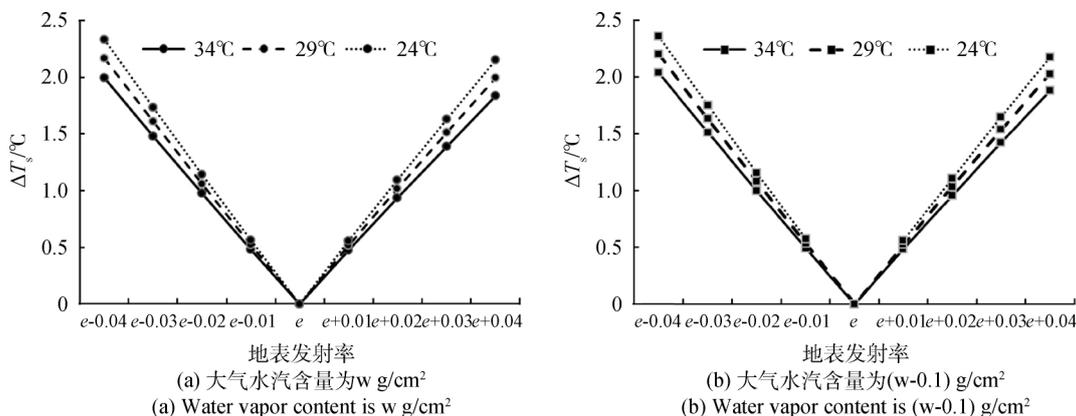


图 6 相同大气水汽含量和近地面气温条件下地表发射率误差对反演结果的影响

Fig. 6 Impact of land surface emissivity errors on retrieval result with fixed water vapor contents and near-surface temperatures

从表 6、图 6 可以看出,1) 当大气水汽含量 w 和近地面气温 T_0 保持恒定时,地表发射率变化带来的地表温度反演结果的变化规律为:近地面气温分别为 $24\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $29\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $34\text{ }^\circ\text{C}$ 时,地表发射率变化(包括增

加或减少) 0.01 , 分别带来约 $0.57\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0.52\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $0.47\text{ }^\circ\text{C}$ 的地表温度反演误差 ΔT_s ; 2) 近地面气温较低时,地表发射率变化对温度反演的影响更加敏感。随着近地面气温的降低,地表发射率的估算误

差对地表温度反演结果的影响加大; 3) 随着大气水汽含量的降低, 地表发射率的估算误差对地表温度的影响增加。当大气水汽含量减少 0.1 g/cm^2 , 近地面气温为 $24 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 地表发射率变化(增加或者减少) 0.01 可带来 $0.57 \text{ }^\circ\text{C}$ 的地表温度反演误差。表 6 和图 6 只列出了大气水汽含量为 $w \text{ g/cm}^2$ 和 $w - 0.1 \text{ g/cm}^2$ 的两种情况, 其他情况也可以得到上述类似结论。

(2) 大气水汽含量敏感性

当地表发射率固定时, 在不同的近地面气温条件下, 大气水汽含量的误差对反演结果的影响如表 7、图 7 所示, 其中 $T_s(w - 0.4)$ 表示大气水汽含量为 $w - 0.4$ 时反演得到的地表温度, w 为反演得到的大气水含量, 其他命名原则相同。

表 7 相同近地面气温条件下大气水汽含量误差对反演结果的影响

Table 7 Impact of water vapor content errors on retrieval result with fixed near-surface temperature

温度结果差值计算 $ T_s(x + \Delta x) - T_s(x) $	差值均值 $\Delta T_s / ^\circ\text{C}$		
	近地面 气温 24	近地面 气温 29	近地面 气温 34
$ T_s(w-0.4) - T_s(w) $	1.036	0.484	0.068
$ T_s(w-0.3) - T_s(w) $	0.803	0.376	0.051
$ T_s(w-0.2) - T_s(w) $	0.554	0.259	0.034
$ T_s(w-0.1) - T_s(w) $	0.286	0.135	0.017
$ T_s(w+0.1) - T_s(w) $	0.308	0.145	0.017
$ T_s(w+0.2) - T_s(w) $	0.638	0.302	0.035
$ T_s(w+0.3) - T_s(w) $	0.995	0.471	0.052
$ T_s(w+0.4) - T_s(w) $	1.379	0.665	0.069

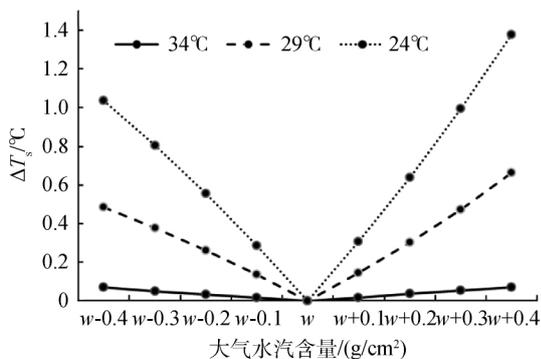


图 7 相同近地面气温条件下大气水汽含量误差对反演结果的影响

Fig. 7 Impact of water vapor content errors on retrieval result with fixed near-surface temperatures

从表 7、图 7 中可以看出: 1) 大气水汽含量变化(增加或者减少)会带来地表温度反演误差, 增加或者减少越多, 地表温度反演误差越大; 2) 近地面气温越低, 大气水汽含量的估算误差对地表温度反演误差的影响越大。当近地面气温为 $24 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 大气水汽含量每变化 0.1 g/cm^2 , 大约带来 $0.31 \text{ }^\circ\text{C}$ 的地表温度反演误差, 其数值变化的敏感度比地表发射率要小。

(3) 近地面气温的敏感性

当地表发射率固定时, 不同的大气水汽含量下, 近地面气温的误差对反演结果的影响如表 8 所示, 其中 $T_s(34)$ 表示近地面气温为 $34 \text{ }^\circ\text{C}$ 时反演得到的地表温度, 其他命名原则相同。

表 8 相同大气水汽含量条件下近地面气温误差对反演结果的影响

Table 8 Impact of near-surface temperature errors on retrieval result with fixed water vapor content

大气水汽含量 $w (\text{g/cm}^2)$	温度结果差值计算 $ T_s(x + \Delta x) - T_s(x) $	差值均值 $\Delta T_s / ^\circ\text{C}$
$w - 0.4$	$ T_s(24) - T_s(-29) $	1.877
	$ T_s(34) - T_s(-29) $	1.875
$w - 0.3$	$ T_s(24) - T_s(-29) $	2.002
	$ T_s(34) - T_s(-29) $	1.999
$w - 0.2$	$ T_s(24) - T_s(-29) $	2.135
	$ T_s(34) - T_s(-29) $	2.133
$w - 0.1$	$ T_s(24) - T_s(-29) $	2.277
	$ T_s(34) - T_s(-29) $	2.275
w	$ T_s(24) - T_s(-29) $	2.429
	$ T_s(34) - T_s(-29) $	2.426
$w + 0.1$	$ T_s(24) - T_s(-29) $	2.592
	$ T_s(34) - T_s(-29) $	2.588
$w + 0.2$	$ T_s(24) - T_s(-29) $	2.766
	$ T_s(34) - T_s(-29) $	2.763
$w + 0.3$	$ T_s(24) - T_s(-29) $	2.953
	$ T_s(34) - T_s(-29) $	2.950
$w + 0.4$	$ T_s(24) - T_s(-29) $	3.154
	$ T_s(34) - T_s(-29) $	3.150

注: $T_s(34)$ 表示近地面气温为 $34 \text{ }^\circ\text{C}$ 时反演得到的地表温度, 其他命名原则相同。

从表 8 可以看出, 1) 当大气水汽含量 w 保持不变时, 随着近地面气温的升高, 地表温度反演误差逐渐降低; 2) 随着大气水汽含量的升高, 近地面气温的估算误差对地表温度反演误差影响越大。

7 结 论

本文开展了基于 Landsat 8 TIRS 10 数据的地表温度反演方法研究。首先基于热辐射传输方程,根据 TIRS 10 传感器的特性对单窗算法 Q_{in_SC} 进行了改进;然后以 Landsat 8 数据为基本数据源完成了研究区地表温度的遥感反演;将反演值与模拟数据、地表温度实测值等进行对比,验证了地表温度反演结果的精度;分析了本文温度反演算法中的相关参数误差及其对反演结果的影响,讨论了各变量的敏感性,结论如下:

(1) 提出了针对 Landsat 8 TIRS 10 数据的单窗算法。结合 Landsat 8 TIRS 传感器的特性,将单窗算法(Q_{in_SC})中的常量修订为和传感器特性相关的常量,简化了地表温度反演单窗算法。实验研究表明,TIRS10 SC 算法能较好的反映该研究区地表温度及其空间分布特征。研究区地表温度呈现明显分布空间差异,水泥和裸土地表温度明显高于外植被覆盖地区,前者地表温度约介于 24.12—32.25 °C 之间,后者地表温度约介于 10.72—19.79 °C 之间。据地表温度观测数据检验,地表温度反演的平均反演误差为 0.83 °C,相关系数为 0.805,此外,我们还用 MODTRAN 模拟数据对算法进行了精度验证,多数情况下误差为 0.2—0.3 °C 左右,总体上反演温度与模拟数据和实测数据都具有较好的一致性。

(2) 针对研究区的实际情况,通过对算法中的温度参数、地表发射率、大气水汽含量和大气平均作用温度等参数敏感性分析发现,TIRS10 SC 算法能够获得较为可靠的反演结果,同时,TIRS10 SC 算法对大气水汽含量和地表发射率敏感性较高,对大气平均作用温度敏感性稍弱。

另外,本文仅仅针对 TIRS10 开展了单窗算法研究,今后将进一步深入研究 Landsat 8 TIRS 的分裂窗算法。

参考文献(References)

Gao M F, Qin Z H and Liu S C. 2005. Sensitivity analysis of retrieving land surface temperature from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS). *Remote Sensing Information*, (6): 3–6 (高懋芳, 覃志豪, 刘三超. 2005. MODIS 数据反演地表温度的参数敏感性分析. *遥感信息*, (6): 3–6)

Gillespie A, Rokugawa S, Matsunaga T, Cothem J S, Hook S and Kahle

A B. 1998. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1113–1126 [DOI: 10.1109/36.700995]

Jiménez-Muñoz J C and Sobrino J A. 2003. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 108(D22): 4688 [DOI: 10.1029/2003JD003480]

Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Skokovic D, Mattar C and Cristóbal J. 2014. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10): 1840–1843 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2312032]

Kaufman Y J and Gao B C. 1992. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 30(5): 871–884 [DOI: 10.1109/36.175321]

Li F Q, Jackson T J, Kustas W P, Schmugge T J, French A N, Cosh M H and Bindlish R. 2004. Deriving land surface temperature from Landsat 5 and 7 during SMEX02/SMACEX. *Remote Sensing of Environment*, 92(4): 521–534 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.018]

Li H, Zeng Y N, Yun P D, Huang J B, Yang K and Zou J. 2007. Study on retrieval urban land surface temperature with multi-source remote sensing data. *Journal of Remote Sensing*, 11(6): 891–898 (历华, 曾永年, 俞培东, 黄健柏, 杨凯, 邹杰. 2007. 利用多源遥感数据反演城市地表温度. *遥感学报*, 11(6): 891–898) [DOI: 10.11834/jrs.200706120]

Luo J H, Zhang J C, Huang W J, Yang G J, Gu X H and Yang H. 2010. The analysis of consistency between HJ-1B and Landsat 5 TM for retrieving LST based on the single-channel algorithm. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 30(12): 3285–3289 (罗菊花, 张竟成, 黄文江, 杨贵军, 顾晓鹤, 杨浩. 2010. 基于单通道算法的 HJ-1B 与 Landsat 5 TM 地表温度反演一致性研究. *光谱学与光谱分析*, 30(12): 3285–3289)

Mao K B, Qin Z H, Wang J M and Wu S L. 2005. Lowtran retrieval of atmospheric water content and transmittance computation of MODIS bands 31 and 32. *Remote Sensing for Land & Resources*, (1): 26–29 (毛克彪, 覃志豪, 王健明, 武胜利. 2005. 针对 MODIS 数据的大气水汽含量反演及 31 和 32 波段透过率计算. *国土资源遥感*, (1): 26–29)

Mao K B, Shi J C, Qin Z H, Gong P, Xu B and Jang L M. 2006. A four-channel algorithm for retrieving land surface temperature and emissivity from ASTER data. *Journal of Remote Sensing*, 10(4): 593–599 (毛克彪, 施建成, 覃志豪, 宫鹏, 徐斌, 蒋玲梅. 2006. 一个针对 ASTER 数据同时反演地表温度和比辐射率的四通道算法. *遥感学报*, 10(4): 593–599) [DOI: 10.11834/jrs.20060487]

Mao K B, Tang J H, Zhou Q B, Chen Z X, Chen Y Q and Qin Z H. 2007. Retrieving land surface temperature from MODIS data by using radiance transfer equation. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 43(4): 12–17 (毛克彪, 唐华俊, 周清波, 陈仲新, 陈佑启, 覃志豪. 2007. 用辐射传输方程从 MODIS 数据中反演地表温度的方法. *兰州大学学报(自然科学版)*, 43(4): 12–17)

- Meng X H, Lü S H and Zhang T T. 2007. Testing, improvement and application of MODIS near infrared water vapor products-taking Jinta oasis in Heihe River Basin as a case study. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 26(2): 107–111 (孟宪红, 吕世华, 张堂堂. 2007. MODIS 近红外水汽产品的检验、改进及初步应用—以黑河流域金塔绿洲为例. *红外与毫米波学报*, 26(2): 107–111)
- Qin Z H, Karnieli A and Berliner P. 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18): 3719–3746 [DOI: 10.1080/01431160010006971]
- Qin Z H, Li W J, Xu B, Chen Z X and Liu J. 2004. The estimation of land surface emissivity for Landsat TM 6. *Remote Sensing for Land Resources*, (3): 28–32, 36, 41 (覃志豪, 李文娟, 徐斌, 陈仲新, 刘佳. 2004. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计. *国土资源遥感*, (3): 28–32, 36, 41)
- Qin Z H, Gao M F, Qin X M, Li W J and Xu B. 2005. Methodology to retrieve land surface temperature from MODIS data for agricultural drought monitoring in China. *Journal of Natural Disasters*, 14(4): 64–71 (覃志豪, 高懋芳, 秦晓敏, 李文娟, 徐斌. 2005. 农业旱灾监测中的地表温度遥感反演方法—以 MODIS 数据为例. *自然灾害学报*, 14(4): 64–71)
- Ri C, Liu Q H, Li H, Fang L, Yu Y Y and Sun D L. 2013. Improved split window algorithm to retrieve LST from Terra/MODIS data. *Journal of Remote Sensing*, 17(4): 830–840 (Ri C, 柳钦火, 历华, 方莉, Yu Y Y, Sun D L. 2013. 针对 Terra/MODIS 数据的改进分裂窗地表温度反演算法. *遥感学报*, 17(4): 830–840) [DOI: 10.11834/jrs.20132146]
- Rozenstein O, Qin Z H, Derimian Y and Karnieli A. 2014. Derivation of land surface temperature for landsat-8 TIRS using a split window algorithm. *Sensors*, 14(4): 5768–5780 [DOI: 10.3390/s140405768]
- Sobrino J A, Raissouni N and Li Z L. 2001. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. *Remote Sensing of Environment*, 75(2): 256–266 [DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00171-1]
- Sobrino J A, Li Z L, Stoll M P and Becker F. 1996. Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*, 17(11): 2089–2114 [DOI: 10.1080/01431169608948760]
- Sobrino J A, Gómez M, Jiménez-Muñoz J C, Olioso A and Chehbouni G. 2005. A simple algorithm to estimate evapotranspiration from DAIS data: application to the DAISEX campaigns. *Journal of Hydrology*, 315(1/4): 117–125 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.03.027]
- Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C and Paolini L. 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4): 434–440 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.003]
- Stathopoulou M, Cartalis C and Petrakis M. 2007. Integrating Corine Land Cover data and Landsat TM for surface emissivity definition: application to the urban area of Athens, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 28(15): 3291–3304 [DOI: 10.1080/01431160600993421]
- Song T, Duan Z, Liu J Z, Yan F, Sheng S J, Huang J and Wu W. 2015. Comparison of Four Algorithms for Retrieving Land Surface Temperature using Landsat-8 Satellite Data. *Journal of Remote Sensing*, 19(3): 451–464 (宋挺, 段峥, 刘军志, 严飞, 盛世杰, 黄君, 吴蔚. 2015. 基于 Landsat-8 卫星遥感数据的地表温度反演算法对比研究. *遥感学报*, 19(3): 451–464) [DOI: 10.11834/jrs.20154180]
- USGS. 2014. January 29, 2014—Landsat 8 Reprocessing to Begin February 3, 2014 [EB/OL]. http://landsat.usgs.gov/calibration_notices.php, last access 4–26–2015, 2014.
- Wan Z M and Dozier J. 1996. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4): 892–905 [DOI: 10.1109/36.508406]
- Yu X L, Guo X L and Wu Z C. 2014. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*, 6(10): 9829–9852 [DOI: 10.3390/rs6109829]
- Zhou J, Li J, Zhao X, Zhan W F and Guo J X. 2011. A modified single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from HJ-1B satellite data. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 30(1): 61–67 (周纪, 李京, 赵祥, 占文凤, 郭建侠. 2011. 用 HJ-1B 卫星数据反演地表温度的修正单通道算法. *红外与毫米波学报*, 30(1): 61–67)

Land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared data using mono-window algorithm

HU Deyong¹, QIAO Kun¹, WANG Xingling², ZHAO Limin³, JI Guohua¹

1. College of Resource Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
2. National Disaster Reduction Center of China, Ministry of Civil Affairs, Beijing 100025, China;
3. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Land Surface Temperature (LST) is a significant surface biophysical variable. This parameter is also important in vari-

ous fields such as urban thermal environment , agricultural monitoring , surface radiation , and energy balance. Data from Landsat satellites are vital remote sensing data for LST retrieval since the 1980s. The present Landsat 8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) imagery provides a new data source for LST retrieval. Landsat 8 TIRS is improved compared with the Landsat 6 Thematic Mapper. Landsat 8 data are extensively applied , so the mono-window algorithm should be updated with new sensor characteristics. Therefore , we aim to explore an adaptive method with more reliable accuracy to retrieve LST using Landsat 8 TIRS data.

In this paper , a relation model (TIRS10_SC) was established between LST and several parameters , namely , brightness temperature , mean atmospheric temperature , atmospheric transmittance , and land surface emissivity. The model was based on the radiative transfer equation and characteristics of Landsat 8 TIRS10. The LSTs of the study area were retrieved by initially deriving the atmospheric transmittance from MODIS data and MODTRAN simulation results. Then , the mean atmospheric temperature was obtained using empirical formulas , and land surface emissivity was retrieved from the Landsat 8 OLI data using image classification-based method. Finally , the LSTs of the study area were retrieved from the processed data. The algorithm and retrieval results were assessed by simulated and measured data. Meanwhile , the sensitivity of variables in the mono-window algorithm was analyzed.

Results show that the mono-window algorithm can perform well for Landsat8 TIRS data for LST retrieval. The LSTs of different land-cover types in study area varied. The LSTs of bare soil and cements were evidently higher than those of the vegetated areas. The LST of the former varied between 24.12 °C and 32.25 °C , whereas that of latter ranged from 10.72 °C to 19.79 °C. Furthermore , compared with the measured data , the average error and correlation coefficient of retrieved LSTs were 0.83 °C and 0.805 , respectively. The accuracy of the algorithm was also assessed using simulated data , which showed that the error in the LST data in the majority of cases ranged between 0.2 °C and 0.3 °C. The retrieval results agree with the assessed temperature data. Results from the analysis of the sensitivities of land surface emissivity , atmospheric water vapor content , and average temperature showed that the TIRS10_SC algorithm can obtain more reliable results with higher sensitivities for the former two parameters and lower sensitivity for the latter one. The proposed algorithm can be applied for the fast retrieval of LST using Landsat 8 TIRS data.

Key words: thermal remote sensing , land surface temperature retrieval , mono-window algorithm , Landsat 8 TIRS , MODIS