

文章编号: 1007-4619 (2000) 01-0008-06

陆面温度反演算法 ——劈窗算法的敏感度分析

张霞, 朱启疆, 闵祥军

(北京师范大学 资源与环境科学系, 北京 100875)

摘要: 劈窗算法是目前由热红外遥感图像数据获取陆面温度最主要的方法。由于进行地面像元尺度实时陆面温度同步测量的困难, 尚无法直接对现有各劈窗算法进行评判。该文借助于辐射传输模型 LOWTRAN-7 及其提供的 6 种标准大气模式, 进行模拟计算, 分析了 6 种主要劈窗算法对大气廓线误差和比辐射率的敏感度, 作为对劈窗算法适用性的一间接判据。

关键词: 陆面温度获取; 比辐射率; 辐射传输模型; 敏感度

中图分类号: TP702/P407 **文献标识码:** A

1 引言

地表温度是区域和全球尺度地球表层物理过程的一个关键参量, 它综合了地气相互作用和能量交换的结果^[1]。由热红外遥感图像数据(如 NOAA AVHRR 第 4, 5 通道)获取地表温度, 无论是在遥感起始阶段的 70 年代, 还是在遥感发展至今的 90 年代以至未来, 均是十分重要的课题, 并有着极为广阔的应用前景。

劈窗算法因其简便性成为地表温度反演方面最主要的研究方法, 它利用传感器在大气窗口的两个相邻热红外通道对大气水汽的差异吸收实现大气纠正。但在陆面温度反演方面, 由于陆面的复杂性导致的大气纠正的不确定性、地表比辐射率未知以及地表肤温效应显著等因素制约了它在实际中的应用。另外, 由于目前获取地面验证数据的困难, 尚不具备对各种劈窗算法的精度作出直接评判的条件。

本文借助于大气辐射传输模型 LOWTRAN-7 程序, 设定多种大气状况(主要是水汽廓线、温度廓线和能见度)和地面状况(主要是比辐射率和地气温差), 选取常见的 6 种反演陆面温度的劈窗算法, 分析了其对大气廓线误差的比辐射率(包括平均比辐射率和比辐射率差)的敏感度, 以期得到一有意义的间接评价结果。

2 劈窗算法描述

2.1 PRI 算法

Price 于 1984 年在理论分析基础上, 简单订正比辐射率的影响, 首次将劈窗算法应用于农田区温度反演^[2]。Prata 对 Price 算法加以推广改进, 使之可以应用于其它类型大气^[3]:

$$T_s = [(T_4 + \gamma(T_4 - T_5))[(5.5 - \epsilon_4)/4.5] - 0.75 T_4 \Delta \epsilon] \quad (1)$$

其中, $\Delta \epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5$, $\gamma = \frac{1 - t_{04}}{t_{04} - t_{05}}$, t_{04} , t_{05} 为 4, 5 通道的大气透过率, ϵ_4 , ϵ_5 为 4, 5 通道的比辐射率, T_4 , T_5 为 4, 5 通道的卫星亮温。

2.2 BEC 算法

Becker 于 1987 年研究分析了 AVHRR 通道 4, 5 的比辐射率对陆面温度反演的影响, 去耦合大气和比辐射率的综合作用^[4], 在此基础上给出算法表达式:

$$T_s = T_4 + \gamma(T_4 - T_5) + 50(1 - \epsilon)/\epsilon - 300\Delta\epsilon/\epsilon \quad (2)$$

其中, $\epsilon = \frac{\epsilon_4 + \epsilon_5}{2}$ 。

收稿日期: 1998-07-17; 修订日期: 1999-07-02

基金项目: 国家“九·五”攀登项目资助, 编号为 95-预-38。

作者简介: 张霞(1970-), 女, 1998年毕业于北京师范大学资源与环境科学系, 获遥感与地理信息系统硕士学位, 现在中国科学院遥感应用研究所从事大气纠正与陆面温度反演研究。

2.3 BLI 算法

1990年 Becker 和李兆良等在对辐射传输方程线性近似的基础上,进一步讨论了地表比辐射率对陆面温度反演的影响,经回归分析导出该算法^[5]。

$$T_s = 1.274 + T^+ (1.0 + 0.15616\epsilon^* - 0.482\Delta\epsilon/\epsilon^2) + T^- (6.26 + 3.98\epsilon^* + 38.33\Delta\epsilon/\epsilon^2) \quad (3)$$

其中, $T^+ = \frac{T_4 + T_5}{2}$, $T^- = \frac{T_4 - T_5}{2}$, $\epsilon^* = \frac{1 - \epsilon}{\epsilon}$ 。

2.4 PRA 算法

1993年 Prata 在进一步理论推导的基础上对其1991年算法加以改进。从公式中可以很清楚地看出大气和比辐射率是如何影响陆面温度的^[6]。公式如下:

$$T_s = \frac{1 - \gamma}{\delta} T_4 - \frac{\gamma}{\delta} T_5 + c \quad (4)$$

其中, $\delta = \epsilon_4 + \Delta\epsilon_{05}$, $\gamma = \frac{1 - \delta}{\delta} \left[B_4(T) - \Delta I \downarrow \right] \left[\frac{\partial B_4}{\partial T} \right]^{-1} - T$, T 是平均气温, $\Delta I \downarrow$ 是辐射常量, 取值为 $6 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ 。

2.5 SOB 算法

1991年 Sobrino 等以 LOWTRAN-7 为工具,分析了劈窗算法系数对大气参数的依赖关系,在推导劈窗公式时,将大气总水汽含量考虑进去,改善了劈窗算法的精度^[7]。

$$T_s = T_4 + A(T_4 - T_5) + B \quad (5)$$

其中,

$$A = 0.349w + 1.32 + (1.385w - 0.204)(1 - \epsilon_4) + (1.506w - 10.532)(\epsilon_4 - \epsilon_5),$$

$$B = (1 - \epsilon_4)/\epsilon_4 T_5 [-0.146w + 0.561 + (0.575w - 1.966)(\epsilon_4 - \epsilon_5)] - (1 - \epsilon_5)/\epsilon_5 T_5 [-0.095w + 0.320 + (0.597w - 1.916)(\epsilon_4 - \epsilon_5)]$$

w 为总水汽含量。

2.6 UVM 算法

1994年 Coll 等以辐射传输模型为基础,公式中有关大气修正项的系数需由研究区数据导出,算法表达为 $T_4 - T_5$ 的二次方形式,以解决大气衰减的异地差异^[8]。公式表达式为:

$$T_s = T_4 + [1.0 + 0.58(T_4 - T_5)](T_4 - T_5)$$

$$+ 0.51 + \alpha(1 - \epsilon) - \beta \cdot \Delta\epsilon \quad (6)$$

其中, α , β 决定于大气湿度和表面温度(表面反射大气下行辐射部分的贡献)。1997年 Caselles 建立了 α 和 β 与大气水汽总含量(w)和通道亮温的线性关系:^[9]

$$\alpha = (0.19w - 0.103)T_4 - 67w + 107$$

$$\beta = (0.1 + 1.118)T_4 - 68w - 163$$

3 算法对大气廓线误差的敏感度

借助于 LOWTRAN-7 程序计算各算法所需的参数: 传感器高度亮温(T_4 , T_5), 透过率(t_{05} , t_{04}), 总水汽含量 $w(\text{g}/\text{cm}^2)$ 。模拟计算的条件是: (1) 选定 LOWTRAN 提供的 6 种标准大气模式(热带大气、中纬度夏季、中纬度冬季、副极带夏季、副极带冬季、美国 1976 年标准大气), 其温度覆盖范围为 255—320 K, 水汽含量为 0.33—3.32 g/cm^2 , 因而可代表一个大范围的大气状况; (2) 5 种气溶胶衰减廓线(乡村衰减型 $VIS = 23 \text{ km}$, 乡村衰减型 $VIS = 5 \text{ km}$, 海上衰减型 $VIS = 23 \text{ km}$, 城市衰减型 $VIS = 5 \text{ km}$, 对流层衰减型 $VIS = 50 \text{ km}$); (3) 6 种表面温度 $t_0 - 5 \text{ K} - t_0 + 20 \text{ K}$ (t_0 为边界层大气温度); (4) 观测角 $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ 3 种情况; (5) 通道 4, 5 的比辐射率(ϵ_4 和 ϵ_5) 的不同组合共 47 种(ϵ_5 由 0.91 变动到 1.00, $\epsilon_4 - \epsilon_5$ 的变动范围为 $-0.025 - +0.015$), 当 $0.96 \leq \epsilon_5 \leq 1.00$ 且 $-0.025 \leq \epsilon_4 - \epsilon_5 \leq 0.015$ 时, 可代表大多数地表覆盖类型状况, 而当 $0.91 \leq \epsilon_5 \leq 0.95$ 且 $-0.025 \leq \epsilon_4 - \epsilon_5 \leq 0.015$ 时, 可代表卫星观测角较大时的地表比辐射率情况^[10]。共获得 25380 个样本点。

对大气廓线误差的敏感度分析从两方面入手: (1) 对水汽廓线误差的敏感度; (2) 对温度廓线误差的敏感度。对于前者, 将 LOWTRAN-7 提供的 6 种水汽廓线逐层分别给以 $-10\% - 10\%$ 的改变; 对后者, 利用 LOWTRAN-7 提供的 6 种温度廓线, 逐层分别给以 $-4 \text{ K} - +4 \text{ K}$ 的改变, 然后根据上面所述模拟条件分别计算各算法的精度。

本文将所选大气编号为: 1: 热带大气模式; 2: 中纬度夏季模式; 3: 中纬度冬季模式; 4: 副极带夏季模式; 5: 副极带冬季模式; 6: 美国 1976 年标准大气模式。

3.1 算法对水汽廓线误差的敏感度分析

两种水汽廓线误差下的算法误差及误差增量分别见图 1 和表 1, 经分析得出:

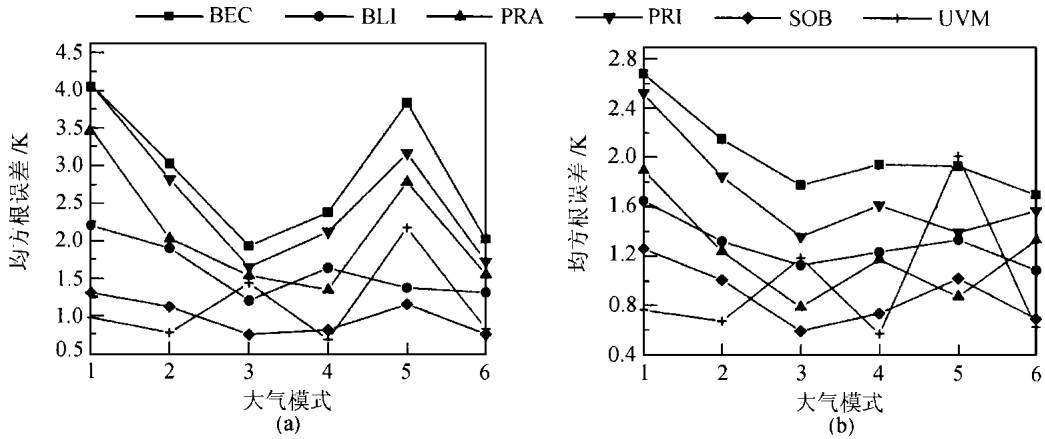


图 1 不同水汽廓线误差下的劈窗算法误差

(a) 为水汽廓线误差在 $\pm 20\%$ 范围时的算法误差 (b) 为水汽廓线误差在 $\pm 10\%$ 范围时的算法误差

Fig. 1 Error of split-window algorithms under different error in water vapor profile

(1) 在热带大气模式和中纬度夏季大气模式下, BEC, BLI, PRA 和 PRI 对水汽廓线误差的敏感度很大, 误差增量超过 0.5 K , 特别是在热带大气下, 除 BLI 外其他 3 种算法的误差增量均超过 1 K ; 在热带大气模式下, 前 4 种算法的精度在水汽廓线误差 $\leq \pm 10\%$ 时, 误差也大于 1.5 K , 当水汽廓线误差 $\leq \pm 20\%$ 时, 误差超过 2 K ; 在中纬度夏季大气模式下, BEC 和 PRI 在水汽廓线误差 $\leq \pm 10\%$ 时, 误差接近或超过 2 K , 在水汽廓线误差 $\leq \pm 20\%$ 时, BLI 和 PRA 算法误差分别接近或超过 2 K , PRI 和 BEC 误差分别接近或超过 3 K 。

(2) 在副极带夏季和美国 1976 年标准大气模式下, 各算法对水汽廓线误差的敏感度均较低。BEC 和 BLI 在副极带夏季模式下, 误差增量不超过 0.5 K ; 在水汽廓线误差 $\leq \pm 20\%$ 时, BEC 和 PRI 误差超过 2 K ; 水汽廓线误差 $\leq \pm 10\%$ 时, BEC 误差也接近 2 K 。

(3) 在副极带冬季大气模式下, BEC, PRA 和 PRI 对水汽廓线误差极为敏感, 误差增量接近 2 K 。在水汽廓线误差 $\leq \pm 10\%$ 时, BEC 误差接近 2 K 。

(4) 在中纬度冬季大气模式下, PRA 对水汽廓线误差的敏感度较大, 误差增量约 1 K ; BEC 在水汽廓线误差 $\leq \pm 10\%$ 时, 误差也接近 2 K 。

(5) 从 6 种大气模式总体考虑, BEC, PRA 和 PRI 算法对水汽廓线误差非常敏感, 平均误差增量接近 1 K 。SOB 和 UVM 算法对水汽廓线误差的敏感度很小, 平均误差增量在 0.1 K 左右。在水汽廓线误差 $\leq \pm 20\%$ 时, 平均误差也在 1 K 左右。

3.2 算法对温度廓线误差的敏感度分析

两种温度廓线误差下的算法误差及误差增量分别见图 2 和表 2, 经分析得出:

(1) 在热带大气模式下, 当温度廓线误差 $\leq \pm 4\text{ K}$ 时, 前 4 种算法的误差均超过 2 K , BEC 和 PRI 接近 4 K 。且以前 4 种算法和 UVM 算法对温度廓线变化敏感, 误差增量超过或接近 0.5 K 。

(2) 在副极带冬季大气模式下, 当温度廓线误差 $\leq \pm 4\text{ K}$ 时, 前 4 种算法和 UVM 算法的误差均很大 (超过 1.5 K), 且随温度廓线变化敏感 (以 BEC, PRA 和 PRI 最为敏感, 误差增量接近或超过 1 K)。

(3) 在中纬度夏季、副极带夏季、中纬度冬季和美国 1976 年标准大气模式下, 各算法对温度廓线误差的敏感度均很小, PRA 算法在中纬度冬季大气模式下误差增量较大, 但不超过 0.5 K ; 当温度廓线误差范围为 $\pm 4\text{ K}$ 时, BEC 和 PRI 的误差很大, 分别接近和大于 2 K 。

(4) 对 6 种大气模式综合考虑, 算法 BEC 和 PRI 即便在温度廓线误差为 $\pm 2\text{ K}$ 范围时, 平均误差也接近或超过 2 K ; PRA 算法在温度廓线误差 $\pm 4\text{ K}$ 范围时, 平均误差超过 2 K ; 在温度廓线误差 $\pm 4\text{ K}$ 范围时, SOB 平均误差仍很小 ($\pm 1\text{ K}$ 以内), UVM 平

表 1 水汽廓线误差不同导致的劈窗算法误差增量

Table 1 Error increment of split-window algorithms caused by the different error of water vapour profile 单位/K

大气模式	BEC	BLI	PRA	PRI	SOB	UVM
1	1.40	0.55	1.59	1.56	0.05	0.21
2	0.88	0.58	0.79	0.97	0.11	0.10
3	0.15	0.08	0.75	0.29	0.16	0.25
4	0.43	0.40	0.17	0.50	0.07	0.11
5	1.90	0.04	1.91	1.77	0.13	0.16
6	0.31	0.22	0.22	0.15	0.06	0.20

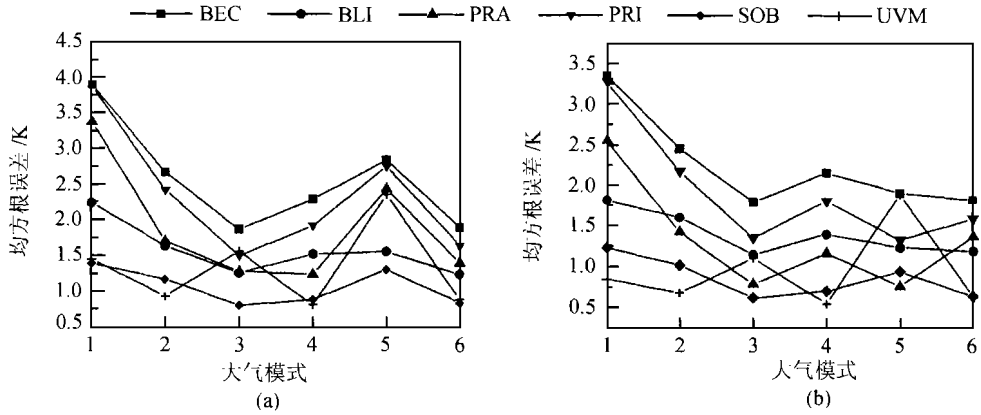


图 2 不同温度廓线误差下的劈窗算法误差
 (a) 为温度廓线误差在±4 K 范围时的精度 (b) 为温度廓线误差在±2 K 范围时的精度
 Fig. 2 Error of split-window algorithms under different error in temperature profile

均误差不超过 1.5 K; PRA 和 PRI 对温度廓线的敏感度较高, 平均误差增量接近或超过 0.5 K。

综合以上分析, SOB 算法和 UVM 算法对水汽廓线敏感度较小, 对温度廓线误差也较不敏感, 且在 6 种大气模式下, 精度均较高, 平均误差小于 1.5 K。而其他算法对大气廓线的敏感度因大气模式的不同而有很大差异, 误差又有不同。

表 2 温度廓线误差不同导致的劈窗算法误差增量

Table 2 Error increment of split-window algorithms caused by the different error of temperature profile 单位/K

大气模式号	BEC	BLI	PRA	PRI	SOB	UVM
1	0.54	0.42	0.82	0.60	0.16	0.60
2	0.21	0.03	0.28	0.24	0.15	0.25
3	0.07	0.11	0.49	0.15	0.18	0.45
4	0.12	0.12	0.07	0.1	0.17	0.26
5	0.93	0.32	1.66	1.42	0.36	0.46
6	0.06	0.04	0.02	0.04	0.19	0.24

4 算法对比辐射率的敏感度分析

对比辐射率的敏感度分析, 定义算法对变量 (x) 的敏感度指数 S_x :

$$S_x = \frac{\partial T_d}{\partial x}$$

其中, T_d 为算法对通道亮温的修正值; $T_d = T_c - T_4$, T_c 为算法反演温度值, T_4 为通道 4 的亮温。

对比辐射率的分析我们从两方面入手, 分别考

察算法对通道 4, 5 的平均比辐射率 (ϵ) 和比辐射率差 ($\epsilon_5 - \epsilon_4$) 的敏感度。文中主要考察了中纬度夏季大气模式下各算法的响应。令比辐射率由 0.90 变动到 1.00, 比辐射率之差 ($\epsilon_5 - \epsilon_4$) 变动范围为 $-0.03 - +0.03$, 分别计算不同算法的 T_d 值, 得到对应不同比辐射率平均值 ϵ 的 T_d 值, 进而求算对应的敏感度。

4.1 算法对平均比辐射率的敏感度 (S_ϵ)

由图 3(a) 并经计算分析得出下面的结论: 所有算法的变化曲线均为直线; 所有算法的 S_ϵ 均为负值, 变化范围为 $-43.19 - -19.56$ K (分别对应 PRA 算法和 SOB 算法), 这意味着对应平均比辐射率 0.01 的变化各算法的敏感度区间为 $-0.43 - -0.2$ K。另外, 当平均比辐射率为 0.98 时 (对应大多数植被覆盖地面的情况), 各种算法的 T_d 值在 4—5.5 K 范围 (除了 BLI 算法, T_d 为 6.78 K)。

4.2 算法对通道 4, 5 比辐射率之差 ($\Delta \epsilon = \epsilon_5 - \epsilon_4$) 的敏感度 $S_{\Delta \epsilon}$

由图 3(b) 并经计算得出, 大多数算法与比辐射率之差呈线性关系, 而 BLI 算法和 UVM 算法为二次曲线关系; 呈线性关系的算法中, PRI 算法和 BEC 算法对比辐射率之差 ($\epsilon_5 - \epsilon_4$) 反应最为敏感, 也是所有算法中最为敏感的, $S_{\Delta \epsilon}$ 分别为 200 K 和 250 K, 这意味着 $\epsilon_5 - \epsilon_4$ 变化 0.01, 将导致 T_d 变化分别为 2 K 和 2.5 K, SOB 算法的敏感度最小, $S_{\Delta \epsilon}$ 为 15.36 K, PRA 算法敏感度较小, $S_{\Delta \epsilon}$ 为 77 K, 也即 $\epsilon_5 - \epsilon_4$ 变化 0.01, 将分别导致后二者 0.16 K 和约 0.8 K 的变

化;随比辐射率之差呈曲线关系的算法中,BLI 算法、UVM 算法对应的 $S_{\Delta\epsilon}$ 变化区间分别为 4.49—99K, -16—50.59 K (每一区间中,上限对应 $\Delta\epsilon =$

0.03,下限对应 $\Delta\epsilon = -0.03$)。总的来看,除了 SOB 算法,其它算法对 $\Delta\epsilon$ 的敏感度要大于其对平均比辐射率的敏感度。

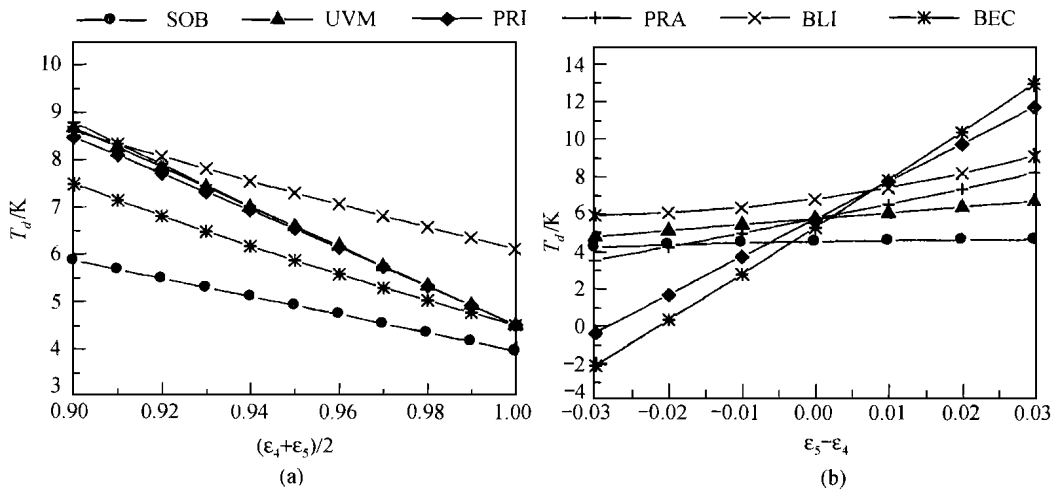


图 3 各算法反演温度值与通道 4 亮温之差随比辐射率的变化
(a) 为平均比辐射率(b) 为通道 4,5 比辐射率之差

Fig. 3 Dependence of the difference between retrieved temperature and bright temperature of channel 4 on the emissivity

5 结 论

由本文分析结果,我们得出如下几点结论:

(1) SOB 算法和 UVM 算法对水汽廓线敏感度较小,对温度廓线误差也较不敏感,且在 6 种大气模式下,精度均较高,平均误差小于 1.5 K。而其他算法对大气廓线的敏感度因大气模式的不同而有很大差异,精度又有不同。

(2) 各算法对平均比辐射率的敏感度差异不大,对应平均比辐射率 0.01 的变化各算法的敏感度范围为 -0.43—-0.2 K (SOB 算法的敏感度最小,PRA 算法的敏感度最大)。

(3) PRI 算法和 BEC 算法对比辐射率之差反应最为敏感,SOB 算法的敏感度最小。

(4) 除 SOB 算法,其它算法对比辐射率差的敏感度大于对平均比辐射率的敏感度。

参 考 文 献 (References)

[1] Sells, P. J., Hall, E. G., Asrar, G., et al. The first ISLSCP Field Experiment (FIFE) [J]. *J. Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998, **69**(1): 22—27.
[2] Price, J. C. Land surface temperature measurement from the split

window channels of the NOAA-7/AVHRR [J]. *J. Geophys. Res.*, 1984, (89): 7231—7237.

[3] Prata, A. J., Caselles, V., Coll, C., et al. Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: Current Status and Future Prospects [J]. *Remote Sens. Review*, 1995, (12): 175—224.
[4] Becker, F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1987, **8**(10): 1509—1522
[5] Becker, F., Zhaoliang Li. Temperature independent spectral indices in thermal infrared bands [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1990, **32**: 17—33.
[6] Prata, A. J. Land surface temperature derived from the AVHRR and ATSR: Theory [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(D9): 16689—16702.
[7] Sobrino, J. A., Caselles, V. Atmospheric correction for land surface temperature measurements obtained over a citrus orchard [J]. *ISPRAS J. Photogram. Remote Sens. Environ.* 1991, **38**: 19—34.
[8] Cool, C., Caselles, V., Sobrino, J. A. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1994, **15**(1): 105—122.
[9] Caselles, V., Coll, C., Vator, E. Land surface temperature determination in the whole HAPEX-Sahel area from AVHRR data [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1997, **18**(5): 1009—1027.
[10] Zheng-ming Wan, Dozier, J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space [J]. *IEEE Trans. Geos. Remote Sens.*, 1996, **34**(4): 892—905.

Analysis of Sensibility on Split-window Algorithms for Retrieving Land-surface Temperature

ZHANG Xia, ZHU Qi-jiang, MIN Xiang-jun

(*Department of Resource and Environment Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: Thermal infrared remote sensing technology supplies an attractive way to measure land-surface temperature (LST) on a large scale simultaneously. NOAA-AVHRR data is commonly used in the inversion study of LST. But the inversion is a challenge for the scientists because of the complexity of land surface. So far split-window algorithm is a major solution to retrieve land-surface temperature from thermal infrared remote sensing data. But because of the obstacle to obtain the in-situ validation measurements simultaneously, including land-surface temperature and emissivity especially in pixel scale, it is confined to judge directly which one is more precious and more applicable.

In this paper, using radiative transfer code LOWTRAN-7 and six standard atmosphere models supplied by it, we analyzed, by simulation, the sensibility of the six common split-window algorithms to the atmospheric profile error, including atmospheric water vapor profile and temperature profile. The sensibility to spectral emissivity, including the average emissivity and the differential emissivity between AVHRR channels 4 and 5, is also analyzed. It turns out that, (1) algorithms of SOB and UVM have less sensibility to atmospheric profile, and have more satisfactory accuracy of better than 1.5K; (2) most algorithms are more sensible to the mean emissivity than to the emissivity difference. Sobrino (1991) algorithm has the least sensibility to emissivity. As a result, we obtained an indirect criterion preliminarily for the six split-window algorithms.

Key words: split-window algorithm; surface emissivity; radiance transfer model