

# 大气气溶胶对用红外窗区通道 遥感陆面温度的影响\*

汪宏七 赵高翔 王立志

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

**摘要** 分析了大气气溶胶对红外窗区通道辐射传输的影响, 考察了在用红外窗区通道反演陆面温度中, 大气温度和湿度廓线没有误差时, 大气气溶胶的不确定性对反演精度的影响, 以及大气温度、湿度和气溶胶同时有偏差对地面温度反演精度的影响。

**关键词** 陆面温度, 反演算法, 气溶胶, 卫星遥感, 大气订正。

## EFFECT OF ATMOSPHERIC AEROSOLS ON REMOTE SENSING OF LAND SURFACE TEMPERATURE AT INFRARED WINDOW CHANNELS\*

WANG Hong-Qi ZHAO Gao-Xiang WANG Li-Zhi

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract** The effects of atmospheric aerosols on radiative transfer in infrared window channels were analyzed. For the land surface temperature retrieval at infrared window channels, the effects of the uncertainties in atmospheric aerosol and the effects of the deviations in atmospheric temperature, moisture and aerosol on the retrieval accuracy were investigated.

**Key words** land surface temperature, retrieval algorithm, aerosol, satellite remote sensing, atmospheric correction.

### 引言

陆面温度和洋面温度的卫星遥感都利用处在大气气体吸收很弱的红外窗区通道, 以尽量减少大气对温度反演精度的影响。在通道的比辐射率已知的洋面情况下, 可用分裂窗方法消除大气影响, 得到洋面温度; 但在陆面的情况下, 地表复杂多变, 通道的比辐射率一般不可能预先知道, 难以应用在洋面时行之有效的分裂窗方法来得到地面温度。地面温度和比辐射率之间的耦合成为由卫星遥感得到精确的地面温度的一个主要困难。对此, 我们提出了双时相二通道反演算法, 在不考虑大气影响的情况下, 用这种反演算法, 通常可以得到地面温度和通道地表比辐射率的确定的解<sup>[1]</sup>。但在实际情况下, 虽然用于地面温度遥感的通道选在大气红外窗区, 但大气影响

仍是不可忽略的, 相对吸收带而言, 在大气窗区气溶胶影响的相对重要性显得更为突出。对陆面温度的卫星遥感, 在考虑大气订正时, 与大气温度和湿度不同, 陆地上空大气气溶胶还没有实时的测量资料可用, 而大气气溶胶又具有很强时空变化特性, 因此, 它的影响可能具有更大的不确定性。为此, 要实际应用这种算法反演地面温度, 必须对大气气溶胶对地面温度反演精度的影响有较为清楚的了解。

### 1 反演算法

假定通道的地表比辐射率在二次测量时保持不变, 则利用在卫星上处于大气红外窗区的二个通道在二个不同时刻的测量, 就能同时确定地面温度和通道的比辐射率<sup>[1]</sup>。第  $i$  通道, 第  $j$  次测量的大气顶射出辐射强度  $I_i$ , 可表示为

\* 国家自然科学基金(编号: 49875006)资助项目  
稿件收到日期 2000-06-01, 修改稿收到日期 2001-03-05

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 49875006)  
Received 2000-06-01, revised 2001-03-05

$$I_{ij} = \epsilon_i B_i(T_{s,i}) \tau_{i,j} + (1 - \epsilon_i) \tau_{i,j} I_{d,j} + I_{u,j}, \quad (1)$$

$$i = 1, 2; j = 1, 2.$$

式(1)中,  $\epsilon_i$  是地面比辐射率,  $B$  为地面 Planck 辐射强度,  $T_i$  为地面温度,  $\tau_{i,j}$  为从地面到卫星的大气路径透过率,  $I_{d,j}$  为大气有效向下辐射强度,  $I_{u,j}$  为大气路径向上辐射强度. 把地面向上辐射强度  $I_{u,i}$  表示为

$$I_{u,i} = \epsilon_i B_i(T_{s,i}) + (1 - \epsilon_i) I_{d,i}, \quad (2)$$

式(2)中,  $I_{u,i} = (I_{ij} - I_{u,j})/\tau_{i,i}$  可以由测量量  $I_{ij}$  以及计算量  $I_{u,j}$  和  $\tau_{i,i}$  算出. 假定地面比辐射率满足  $\epsilon_{i1} = \epsilon_{i2} = \epsilon_i (i = 1, 2)$ , 则式(2)可表示为

$$I_{u,i} = \epsilon_i B_i(T_{s,i}) + (1 - \epsilon_i) I_{d,i}, \quad (3)$$

$$i = 1, 2; j = 1, 2.$$

由式(3)所表示的方程组中, 有四个独立的方程, 未知数为二个地面温度和二个通道的比辐射率. 消去通道比辐射率后, 可以得到

$$a_i B_i(T_{s,i}) - B_i(T_{s,j}) + d_i = 0, i = 1, 2. \quad (4)$$

式(4)中,

$$a_i = (I_{u,i2} - I_{d,i2}) / (I_{u,i1} - I_{d,i1}),$$

$$d_i = I_{d,i2} - a_i I_{d,i1}, i = 1, 2.$$

大气有效向下辐射强度  $I_d$  和地面向上辐射强度  $I_u$  可计算得到. 当二次测量时通道的比辐射率不变, 大气辐射量和透过率  $I_d, I_u$  和  $\tau_{i,j}$  可完全精确计算得到, 即没有大气订正误差的影响时, 未知的二次测量时的地面温度  $T_{s1}$  和  $T_{s2}$  可用迭代方法精确确定, 二个通道的比辐射率  $\epsilon_i$  就可由式(3)得到.

## 2 大气气溶胶的影响

地面温度的卫星遥感是利用处在大气红外窗区的通道(如中心在  $930.58\text{cm}^{-1}$  和  $848.18\text{cm}^{-1}$  的 AVHRR 的 4 和 5 通道). 晴空时, 红外窗区通道的大气向下和向上辐射强度  $I_d$  和  $I_u$  以及大气透过率  $\tau_{i,j}$  主要受大气温度和湿度廓线以及大气气溶胶的影响. 在这些大气参数有误差时, 计算出的大气辐射量和透过率也总是有误差的, 这将最终影响到地面温度的反演精度. 这里将对大气气溶胶对地面温度反演的影响进行考察. 把大气气溶胶有误差时计算出的大气辐射量和透过率标记为  $I_d^*$ ,  $I_u^*$  和  $\tau_{i,j}^*$ , 用以代替遥感方程(1)中实际的大气向下辐射、大气向上辐射和大气透过率. 则可以得到

$$I_{ij}^* = \epsilon_i B_i(T_{s,i}) \tau_{i,j}^* + (1 - \epsilon_i) \tau_{i,j}^* I_{d,j}^* + I_{u,j}^* \quad (5)$$

由于计算得到的大气向上和向下辐射以及大气透

率有误差, 对实际的地面温度和比辐射率, 由式(5)算出的大气顶射出辐射强度  $I_{ij}^*$  一般不等于测量值  $I_{ij}$ . 令  $\epsilon_{ij}^* = \epsilon_i + \Delta\epsilon_{ij}$ , 使得式(5)中用  $\epsilon_{ij}^*$  代替  $\epsilon_i$  时的计算结果等于测量值  $I_{ij}$ , 即

$$I_{ij} = \epsilon_{ij}^* B_i(T_{s,i}) \tau_{i,j}^* + (1 - \epsilon_{ij}^*) \tau_{i,j}^* I_{d,j}^* + I_{u,j}^* \quad (6)$$

在实际陆面温度反演时, 能够计算得到的大气辐射量是式(6)中的  $I_{d,j}^*, I_{u,j}^*$  和  $\tau_{i,j}^*$ . 这时, 即使实际的通道比辐射率在二次测量时不变 ( $\epsilon_{i1} = \epsilon_{i2} = \epsilon_i, i = 1, 2$ ), 在用来进行反演的式(6)中通道的表现地表比辐射率  $\epsilon_{ij}^*$  在二次测量时一般不再相等. 反演得到的地面温度也就一定会有一定的误差.

## 3 模拟试验

在考察大气气溶胶对地面温度反演影响时, 用了中心在  $930.58\text{cm}^{-1}$  和  $848.18\text{cm}^{-1}$  的二个通道, 根据在地面温度反演时进行大气辐射传输计算所考虑的大气气溶胶的误差不同, 把反演情况划分成 10 个不同的类. 当实际的通道地表比辐射率在二次测量时保持不变, 在辐射传输计算中大气温度和湿度廓线也没有误差, 只有大气气溶胶有各种不同偏差的反演情况给出在表 1 中. 表 1 中每一类都包括对通道的地表比辐射率、地面温度、大气的温度和湿度廓线不同的 12 组测量的反演, 相应于测量值的大气气溶胶为 LOWTRAN7 的气溶胶模式: 在  $0 \sim 2\text{km}$  的大气边界层为地面能见度为  $15\text{km}$  的乡村气溶胶;  $2 \sim 10\text{km}$  为对流层气溶胶; 在第 1 到第 8 类中,  $10\text{km}$  以上为背景平流层气溶胶, 在第 9 和第 10 类中,  $10\text{km}$  以上为中等强度的火山气溶胶<sup>[2]</sup>. 对第 1 到第 8 类反演, 大气订正时考虑的气溶胶只是在  $0 \sim 2\text{km}$  的大气边界层中的乡村气溶胶模式的浓度有不同; 对 9 和 10 类, 大气边界层和平流层气溶胶都有偏差. 表 1 中的 'VIS' 表示与各类情况下的边界层气溶胶浓度有关的二次测量时的地面水平能见度,  $\Delta\delta_{\text{VIS}}/\delta_{\text{VIS}}$  表示在二个测量时刻进行大气订正时所用的气溶胶的整层大气光学厚度的均方根相对偏差,  $\Delta I_d/I_d, \Delta I_u/I_u$  和  $\Delta\tau_{i,j}/\tau_{i,j}$  分别为大气气溶胶的误差造成的大气路径向上辐射、大气有效向下辐射和大气路径透过率的均方根相对误差,  $\Delta\epsilon_i$  为大气气溶胶的误差造成的表现地表比辐射率与实际地表比辐射率的均方根偏差,  $\Delta\epsilon_{i2}$  为二次测量时通道的表现地表比辐射率之间的均方根偏差. 在大气气溶胶有不同偏差的各类情况下, 反演得到的地表比辐射率和地面温度的均方根误差由  $rmse\epsilon_i$  和  $rmseT_i$  表

示,  $\Delta T_{\max}$  为反演得到的地面温度的极大偏差. 在表 1 中第 1 类的情况下, 二次测量时地表比辐射率不变, 且没有大气订正误差, 从而地面温度和比辐射率都可精确确定; 但在其它各类情况下, 大气气溶胶偏差使得反演得到地面温度和比辐射率都有不同程度的误差. 就趋势而言, 随着气溶胶偏差的增大, 辐射传输计算误差增加, 地面温度的反演误差也增大.

在其它情况都与表 1 相同, 只是实际的通道地表比辐射率在二次测量时有变化的情况下 ( $\Delta \epsilon_{\text{vis}} = 0.0080$ ), 大气气溶胶对红外窗区通道辐射传输计算和通道的表现地表比辐射率影响, 以及最终对地面温度反演的影响见表 2. 这时, 由于地表比辐射率本身有变化, 即使没有大气订正误差, 地面温度也不可能精确确定 (如表中的第 1 类情况所示). 与没有气溶胶偏差的第 1 类情况相比, 除了气溶胶有很大偏差的第 5 和第 8 类, 在其他有不同气溶胶偏差的情况下, 地面温度的反演误差并没有明显增加; 与表 1 中气溶胶影响相同的各类情况相比, 则可看到, 在二次测量时地表比辐射率有变化, 同时又有气溶胶影响时, 地面温度的反演误差并不一定比只有气溶胶影响时大, 有时因这两种因素的作用相互抵消使误差反而减小.

在二次测量时通道的实际地表辐射率变化和气溶胶偏差的情况与表 2 一样, 但同时在全类情况下, 大气中各层上的温度在  $-2.0\text{K}$  和  $2.0\text{K}$  之间有随机的偏差, 湿度有相对偏差在  $-20\%$  和  $20\%$  之间随机变化时, 对辐射传输计算和地面温度反演的影响见表 3. 考察表 3 与表 2 中大气气溶胶偏差相同的各类的情况, 可以看到, 同时有大气温度、湿度和气

溶胶偏差与只有气溶胶偏时相比, 地面温度反演误差一般有增大, 但并不很显著; 在气溶胶影响是主要的第 5 和第 8 类情况下, 地面温度反演误差反而有所减小. 对表 2 和表 3 中所有有所溶胶影响的各类情况, 反演得到的地面温度的均方根偏差分别为  $1.14\text{K}$  和  $1.17\text{K}$ , 后者只是略有增加, 这说明这些大气参数各自都对地面温度反演有明显的影响, 但它们的影响并不是简单地相加. 与只有气溶胶影响的情况相比, 同时有大气温湿度和气溶胶的影响时, 地面温度反演的误差并不是它们的单独作用时误差的线性迭加, 反演误差既可能因共同作用而有所增大, 也可能因彼此的作用相互抵消而减小.

表 1, 表 2 和表 3 中, 第 9 类和第 10 类与第 2 类和第 3 类相比, 考虑的气溶胶的偏差在  $0\sim 2\text{km}$  的大气边界层中是相同的, 在  $10\text{km}$  以上的大气层中则不同, 这时, 第 2 类和第 3 类无气溶胶偏差, 第 9 类和第 1 类在大气订正中用背景平流层气溶胶模式代替相应于实际测量时的中等强度火山气溶胶模式, 造成该层中气溶胶光学厚度有约  $73\%$  的显著减少. 在这两种情况下, 虽然平流层气溶胶偏差大不相同, 但整层大气气溶胶光学厚度误差的差别不大, 由此造成的辐射量计算误差和通道的表现地表比辐射率的差别也不大, 最终的地面温度反演精度也没有显著差别. 这些结果表明由于在整层大气气溶胶气溶胶光学厚度中平流层气溶胶的光学厚度所占比例很小, 因此, 即使在大气订正时考虑的平流层气溶胶有很大的误差, 它们对整层大气气溶胶光学厚度误差的贡献一般仍很小, 从而对地面温度反演精度的影响也不大.

表 1 在二次测量时地面比辐射率不变的情况下, 大气气溶胶对地面温度反演的影响  
Table 1 Effects of atmospheric aerosol on land surface temperature retrievals for the case with land surface emissivity unchanged at two measurement times

类	VIS (km)	$\Delta \epsilon_{\text{vis}}/\epsilon_{\text{vis}}$ (%)	$\Delta \epsilon_1$	$\Delta \epsilon_{21}$	$\Delta T_1/T_1$ (%)	$\Delta T_2/T_2$ (%)	$\Delta T_1/T_2$ (%)	$\text{rmse} \epsilon_s$	$\text{rmse} T_1$ (K)	$\Delta T_{\text{max}}$ (K)
1	(15, 15)	(0, 0, 0, 0)	0.0	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	(20, 20)	(-22.5, -22.7)	0.0026	0.0036	5.63	7.79	3.76	0.0199	0.87	-1.75
3	(23, 23)	(-32.0, -32.0)	0.0037	0.0050	7.95	8.18	1.08	0.0195	0.83	-1.75
4	(10, 10)	(13.4, 43.1)	0.0051	0.0074	10.64	10.71	1.45	0.0248	1.20	2.50
5	(5, 5)	(170.8, 150.8)	0.0205	0.0253	36.37	36.33	4.94	0.0282	1.65	-2.89
6	(20, 10)	(-22.7, 17.1)	0.0045	0.0065	8.67	8.84	1.16	0.0274	1.29	2.50
7	(10, 23)	(43.4, -32.0)	0.0044	0.0065	9.30	9.50	1.28	0.0249	1.15	2.32
8	(23, 7)	(-32.0, 150.8)	0.0167	0.0238	27.12	27.16	3.57	0.0311	1.62	-2.94
9	(20, 20)	(-26.0, -26.0)	0.0029	0.0035	5.71	5.92	0.82	0.0201	0.87	-1.78
10	(23, 23)	(-34.9, -34.9)	0.0039	0.0047	8.05	8.31	1.14	0.0200	0.86	-1.78

对全部有气溶胶影响的情况

$\text{rmse} T_1 = 1.14\text{K}$

表 2 在二次测量时地面比辐射率有变化的情况下,大气气溶胶对地面温度反演的影响  
Table 2 Effects of atmospheric aerosol on land surface temperature retrievals for the case with land surface emissivity varied at two measurement times

类	VIS (km)	$\Delta\delta_{surf}/\delta_{surf}$ (%)	$\Delta\epsilon_s$	$\Delta\epsilon_{s2}$	$\Delta I_a/I_a$ (%)	$\Delta J_a/J_a$ (%)	$\Delta\tau_s/\tau_s$ (%)	rmse $\epsilon_s$	rmse $T_s$ (K)	$\Delta T_{max}$ (K)
1	(15,15)	(0,0,0,0)	0.0	0.0080	0.0	0.0	0.0	0.0224	0.99	-1.99
2	(20,20)	(-22.7,-22.7)	0.0026	0.0100	5.63	5.79	0.76	0.0231	1.01	-2.13
3	(23,23)	(-32.0,-32.0)	0.0036	0.0101	7.95	8.18	1.08	0.0232	1.01	-2.19
4	(10,10)	(43.4,43.4)	0.0053	0.0083	10.64	10.81	1.45	0.0205	0.99	-1.78
5	(5,5)	(150.8,150.8)	0.0203	0.0255	36.37	36.33	4.94	0.0267	1.56	2.63
6	(20,10)	(-22.7,43.4)	0.0045	0.0101	8.67	8.84	1.16	0.0229	1.04	1.79
7	(10,23)	(43.4,-32.0)	0.0041	0.0096	9.30	9.50	1.28	0.0232	1.06	-2.07
8	(23,5)	(-32.0,150.8)	0.0164	0.0236	27.12	27.16	3.57	0.0261	1.37	2.90
9	(20,20)	(-26.0,-26.0)	0.0029	0.0100	5.74	5.92	0.82	0.0234	1.03	-2.20
10	(23,23)	(-34.9,-34.9)	0.0038	0.0110	8.05	8.31	1.14	0.0236	1.03	-2.26

对全部有气溶胶影响的情况 rmse $T_s$ =1.14K

表 3 在二次测量时地面比辐射率有变化的情况下,大气温度、湿度和气溶胶对地面温度反演的影响  
Table 3 Effects of atmospheric temperature, moisture and aerosol on land surface temperature retrievals for the case with land surface emissivity varied at two measurement times

类	VIS (km)	$\Delta\delta_{surf}/\delta_{surf}$ (%)	$\Delta\epsilon_s$	$\Delta\epsilon_{s2}$	$\Delta I_a/I_a$ (%)	$\Delta J_a/J_a$ (%)	$\Delta r_s/r_s$ (%)	rmse $\epsilon_s$	rmse $T_s$ (K)	$\Delta T_{max}$ (K)
1	(15,15)	(0,0,0,0)	0.0177	0.0275	10.94	10.00	5.39	0.0307	1.12	2.12
2	(20,20)	(-22.7,-22.7)	0.0193	0.0302	15.15	14.44	5.97	0.0305	1.12	2.22
3	(23,23)	(-32.0,-32.0)	0.0200	0.0312	17.10	16.51	6.22	0.0292	1.05	2.25
4	(10,10)	(43.4,43.4)	0.0151	0.0232	9.04	8.65	4.49	0.0290	1.08	1.93
5	(5,5)	(150.8,150.8)	0.0137	0.0145	30.08	30.54	4.12	0.0316	1.40	2.48
6	(20,10)	(-22.7,43.4)	0.0175	0.0279	12.47	11.90	5.38	0.0297	1.04	1.93
7	(23,5)	(43.4,-32.0)	0.0175	0.0268	13.73	13.24	5.31	0.0308	1.28	2.25
8	(23,5)	(-32.0,150.8)	0.0183	0.0286	25.16	25.27	5.54	0.03231	1.29	2.48
9	(20,20)	(-26.0,-26.0)	0.0194	0.0300	15.21	14.53	6.02	0.0307	1.11	2.18
10	(23,23)	(-34.9,-34.9)	0.0201	0.0310	17.16	16.60	6.27	0.0294	1.05	2.22

对全部有气溶胶影响的情况 rmse $T_s$ =1.17K

#### 4 结语

由双时相二通道算法进行地面温度反演的模拟试验可见,在二次测量时实际的通道地表比辐射率的变化、大气温湿度的偏差和大气气溶胶对辐射传输计算和通道的表现地表比辐射率都有明显的影响,从而影响到地面温度反演的精度,但地面温度反演的误差并不是它们单独作用时误差的线性迭加,反演误差既可能因共同而有所增加,也可能因彼此的作用相互抵消而减小,在实际情况下进行地面温度反演时,大气温湿度和气溶胶的偏差的同时存在是普遍情况,通常,大气温度和湿度廓线可以由探空或卫星遥感得到,且精度较好,而陆地上空的大气气溶胶,一般还没有地面测量或卫星遥感资料可以利用,因此,在考虑气溶胶影响时,只能利用已有的气

溶胶模式或在有些情况下根据地面能见度来估计,但由于大气气溶胶和大气温湿度对地面温度反演误差的影响并不是线性相加的,因此,当大气温湿度廓线具有较好精度时,即使大气气溶胶有一定的不确定性,只要误差不是很大,将不至于对地面温度反演精度造成严重影响。

#### REFERENCES

- [1] ZHAO Gao-Xiang, WANG Hong-Qi. Algorithms for determination of land surface temperatures and emissivities from satellite radiative measurements. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(15): 1303
- [2] Kneizys F X, Shettle E P, Abreu L W, et al. User's Guide to LOWTRAN 7. AFGL-TR-88-0177. *Environmental Research Papers* No. 1010, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA, 1988