

红外高光谱观测值反演云参数

官莉¹ 肖稳安¹ HUANG Hung-Lung²

¹ 南京信息工程大学遥感学院, 南京 210044

² University of Wisconsin, Madison WI 53705, USA

摘要 最小局部比辐射率变化 MLEV 算法根据在红外长波 10~15 μm 区, 云的吸收、发射和散射具有相对有限的局部谱变化的特征, 利用对云敏感的长波红外辐射观测值来同时反演单层云的云顶高度和有效云比辐射率谱。先给定一些假想的云高初始猜测, 最佳的云高和比辐射率谱解使得用这些不同云高计算得到的比辐射率谱的局部变化最小, 该算法适用于高光谱(光谱分辨率从 0.25~1 cm^{-1})的大气红外探测器。通过用两种不同方案的内部比较及与激光雷达观测和 MODIS 业务云高产品的对比验证, 说明对卫星红外高光谱观测资料采用 MLEV 算法同时反演单层云的云顶高度和云有效比辐射率谱是非常有效的, 尤其是对中高云。

关键词 高光谱 云参数 云顶高度 反演 MLEV 算法

文章编号 1006-9895 (2007) 06-1123-06

中图分类号 P407

文献标识码 A

Retrieval of Cloud Parameters Using Infrared Hyperspectral Observations

GUAN Li¹, XIAO Wen-An¹, and HUANG Hung-Lung²

¹ School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

² University of Wisconsin, Madison WI 53705, USA

Abstract This paper describes the theory and application of Minimum Local Emissivity Variance (MLEV) technique for simultaneous retrieval of cloud pressure level and effective spectral emissivity from high-spectral resolution radiances, for the case of single-layer clouds. The MLEV algorithm uses a physical approach, in which the local spectral variances of cloud emissivity are calculated for a number of cloud pressure levels. The optimal solution for the single-layer cloud emissivity spectrum is that having the “minimum local emissivity variance” among the retrieved emissivity spectra associated with different first-guess cloud pressure levels. This is due to the fact that the absorption, reflection, and scattering processes of clouds exhibit relatively limited localized spectral emissivity structure in the infrared long wave region. Validation with cloud lidar observations and MODIS cloud products indicates the MLEV algorithm is very effective, especially to mid-high clouds.

Key words hyperspectral, cloud property, cloud top height, retrieval, MLEV algorithm

1 引言

云的辐射特性和它的高度影响到辐射的收支, 可以导致地球的变暖或变冷, 在地球大气能量收支平衡中, 云具有特别显著的调节作用, 是影响气候

变化的一个重要因子^[1, 2]。云顶性质包括云顶气压、云顶温度和有效云量或有效云比辐射率等。卫星观测资料包含了较为丰富的云辐射特性空间和时间变化信息, 利用卫星观测资料反演云参数研究日益受到人们的重视^[3]。云的光谱特征很复杂, 不仅

因为与大气环境有关（像垂直逆温、水平温度梯度、水汽梯度、太阳光反射等），而且由云的不均匀性（在一个视野中有多层云或混合相态）、地表特性（地表的比辐射率和反射率）和局地热力不平衡决定^[4]。

近年来，已有不少相关工作已经开发了很多反演有效云比辐射率（光谱有关的云比辐射率与云覆盖量的乘积）和云顶气压的算法^[5]，如 CO₂ 分层技术^[6, 7]、最小残差法^[8]、一维变分算法^[9]等，但它们只能反演某一波数的比辐射率，而不是对云很敏感的红外长波段上的比辐射率谱。最近，随着高光谱分辨率星载和机载仪器的发展，使可靠反演在各种大气条件下的云比辐射率光谱成为可能。像我们所使用的红外大气探测器 AIRS，不仅光谱分辨率非常高，而且光谱覆盖范围宽，光谱覆盖 3.7~15.4 μm (650~2700 cm⁻¹) 范围内共有 2378 个红外通道，高光谱分辨率平均为 1200 (λ/Δλ)^[10, 11]。

美国威斯康星大学开发的 MLEV (Minimum Local Emissivity Variance) 最小局部比辐射率变化算法利用卫星观测的高光谱分辨率的辐射强度，可同时反演单层云的云顶高度和红外长波 10~15 μm 段的有效光谱比辐射率，且适用于光谱分辨率从 0.25~1 cm⁻¹ 的高光谱仪器。本文将详细介绍该算法。由于 MLEV 算法以前工作主要集中在理论研究和模拟试验上，并没有应用于卫星实际观测资料，在我们的研究中将该算法应用于空基的高光谱红外观测仪 AIRS 实际观测资料中，反演得到了单层云的比辐射率光谱分布和云顶高度，并将两种不同方案的反演结果相互比对，同时利用激光雷达观测结果和 MODIS 业务云高产品来验证该算法。

2 MLEV 算法介绍

在 MLEV 算法所使用的光谱范围内（红外长波段）可以忽略散射，则瞬时视场中光谱通道为 ν 的红外晴空观测辐射率值 $R_{\text{clr}, \nu}$ 可以用下式表示：

$$R_{\text{clr}, \nu} = \epsilon_{s, \nu} B_{s, \nu} \tau_{s, \nu} + \int_{\tau_s}^{\tau_0} B_{\nu} d\tau_{\nu} + (1 - \epsilon_{s, \nu}) \int_{\tau_0}^{\tau_s} B_{\nu} d\tau_{\nu}^* \quad (1)$$

其中， $\epsilon_{s, \nu}$ 是地表比辐射率，下标 s, ν 和 clr 分别表示地表、波数和晴空， B 是普朗克辐射值， τ 是大气向上透过率， τ_s 表示从地面到大气顶的向上透

率，而 τ_0 则为大气顶处的透过率 ($\tau_0 = 0$)， $\tau^* = \tau_s^2 / \tau$ 是与向下大气透过率有关的变量。如果瞬时视场完全被云顶高度为 p_c 的不透光云覆盖 ($\epsilon_c = 1$)，则观测的辐射强度为

$$R_{\text{cd}, \nu} = B_{c, \nu} \tau_{c, \nu} + \int_{\tau_c}^{\tau_0} B_{\nu} d\tau_{\nu} \quad (2)$$

下标 c 表示云顶， τ_c 是云顶到大气顶的向上透过率。对一个部分云覆盖的视场而言，卫星接收到的向上辐射可以写成晴空和云辐射项的线性组合：

$$R_{\nu} = (1 - N\epsilon_{c, \nu}) R_{\text{clr}, \nu} + N\epsilon_{c, \nu} R_{\text{cd}, \nu} \quad (3)$$

其中， $N\epsilon_{c, \nu}$ 是有效云比辐射率，是云比辐射率 $\epsilon_{c, \nu}$ 与云覆盖量 N 的乘积。改写方程 (3) 得到

$$N\epsilon_{c, \nu} = \frac{R_{\nu} - R_{\text{clr}, \nu}}{R_{\text{cd}, \nu} - R_{\text{clr}, \nu}} \quad (4)$$

这是 MLEV 算法的一个关键关系式，从方程中可看出，为了求解有效云比辐射率 $N\epsilon_{c, \nu}$ ，除了要有卫星观测值 R_{ν} 外，算法还需要一个晴空 $R_{\text{clr}, \nu}$ 的估计值和当云顶在不同高度 p_c 时计算的蔽光云辐射值 $R_{\text{cd}, \nu}$ 。MLEV 算法的基本原理就是从近地面到 100 hPa 所有可能的云高中找出一个云高 p_c ，使得在红外长波波段 10~15 μm 有效云比辐射率谱局部变化最小，即满足

$$E(p_c) = \sum_{\nu_1}^{\nu_2} (N\epsilon_{c, \nu} - \overline{N\epsilon_{c, \nu}})^2 \quad (5)$$

其中，

$$\overline{N\epsilon_{c, \nu}} = \sum_{\nu - (\Delta\nu/2)}^{\nu + (\Delta\nu/2)} (N\epsilon_{c, \nu}) / \Delta\nu$$

使 $E(p_c)$ 取得最小值的云气压层就是我们所求的云顶高度。综合考虑仪器观测噪音和敏感性试验研究结果，最佳求和限 ν_1 和 ν_2 分别取 750 cm⁻¹ 和 950 cm⁻¹，用 $\Delta\nu = 5$ cm⁻¹ 定义局部变化^[12]。

根据公式 (4)，目前有两种方案来反演有效云比辐射率谱：(1) 用 AIRS/AMSU 业务的晴空辐射订正值表征 $R_{\text{clr}, \nu}$ ，由晴空订正后业务反演的大气廓线根据公式 (2) 计算不同云高时的 $R_{\text{cd}, \nu}$ ；(2) 将 ECMWF NWP 欧洲中期天气预报中心数值天气预报 (European Center for Medium range Weather Forecasting Numerical Weather Prediction) 的大气温湿、臭氧等垂直廓线客观分析场代入 AIRS 辐射传输模式^[13, 14]，分别由公式 (1)、(2) 计算 $R_{\text{clr}, \nu}$ 、 $R_{\text{cd}, \nu}$ 。

图 1 演示了 MLEV 算法的基本原理，图中曲

线代表当云顶气压分别取初始猜测 200、250、300、350、400 hPa 时计算得到的相应的五个比辐射率谱。从图 1 可看出, 当云高取 300 hPa 时比辐射率谱线变化最小(最平滑, 均方根误差 (RMSE) 为 1.0, 局部变化主要来源于仪器观测噪音), 因此最佳云顶高度为 300 hPa。

模拟试验结果表明, 不论是何种云高还是透光性, 就单层云而言, 除了透明云(如 $N_{e_{c,v}} < 0.2$), 当云有效比辐射率大于 0.1 时, 反演的云顶气压的均方根误差高云时(200~300 hPa)大约是 30 hPa, 中云(500 hPa)约是 10 hPa, 低云时(850 hPa)增加到约 50 hPa。在 900 cm^{-1} 窗区光谱通道上, 有效云比辐射率的均方根误差对高、中和低云而言分别小于 0.05、0.04 和 0.25。

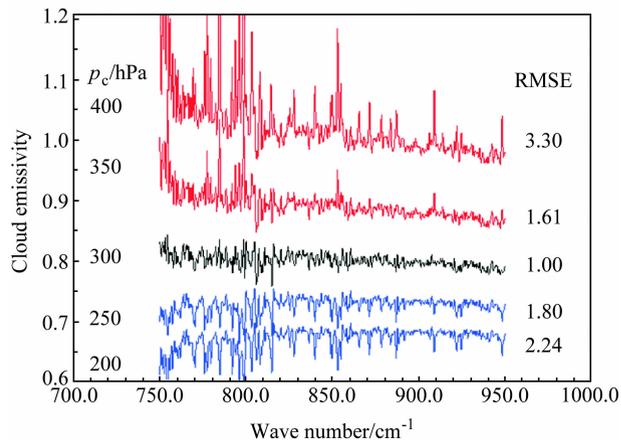


图 1 MLEV 算法的演示
Fig. 1 Example of Minimum Local Emissivity Variance (MLEV) algorithm

3 实际资料应用分析

上面所给出的基本结论都是反演模拟试验得来的, 下面将 MLEV 算法应用到实际的 AIRS 观测资料中。对每一个 AIRS 视场将用上述两种方案来反演云参数(云顶高度和有效云比辐射率), 分别用 AIRS 的业务晴空订正辐射强度及由其反演的晴空大气廓线产品(方案 1)和时间、空间匹配的 ECMWF 客观分析场(方案 2)来计算 MLEV 算法所需要的晴空和不透光云辐射强度, 然后用 AIRS 观测的红外辐射值根据 MLEV 算法来反演云高及有效云比辐射率谱。将所到结果进行比较, 看看是否一致, 同时将两种方案反演的云顶高度与 MODIS 云顶高度产品(MYD06/MOD06)及激光雷达探测的云顶高度作对比, 进一步验证算法的有效性。

图 2 给出了合肥站 (31.52°N , 117.17°E) 激光雷达从 2004 年 3 月 26 日 00 时~31 日 00 时(国际协调时, 下同)观测的后向散射强度垂直剖面, 从图中可看出 26 日 06 时~27 日 06 时、28 日 12 时~29 日 13 时、30 日 15 时~31 日 00 时合肥上空有单层云覆盖。在此时段内, 覆盖合肥的 AIRS 景有 3 月 26 日景 182 (观测时间 18:11~18:17)、3 月 28 日景 180 (观测时间 17:59~18:05) 和 3 月 30 日景 178 (观测时间 17:47~17:53)。

图 3 显示的是 2004 年 3 月 28 日 AIRS 景 180 在窗区通道 900 cm^{-1} 观测的亮度温度分布, 图中标记“+”为合肥站位置。波数 900 cm^{-1} 是窗区通道, 对云和地表特性很敏感, 从图 3 可以看出亮度温度取值从 220K 到 290 K, 是非常冷的冰云和温暖的

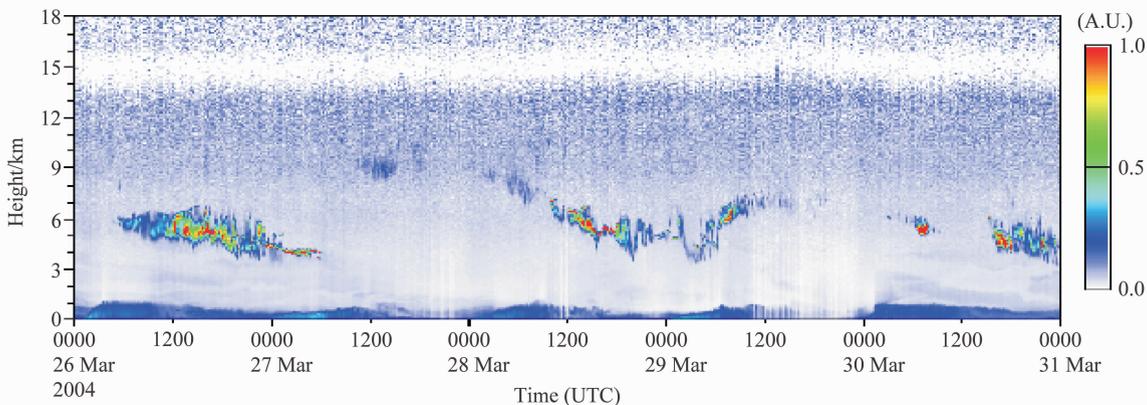


图 2 合肥站激光雷达观测的后向散射强度垂直剖面(激光雷达波长为 532 nm)
Fig. 2 The observed cross section of backscattering intensity by Hefei lidar (wavelength is 532 nm)

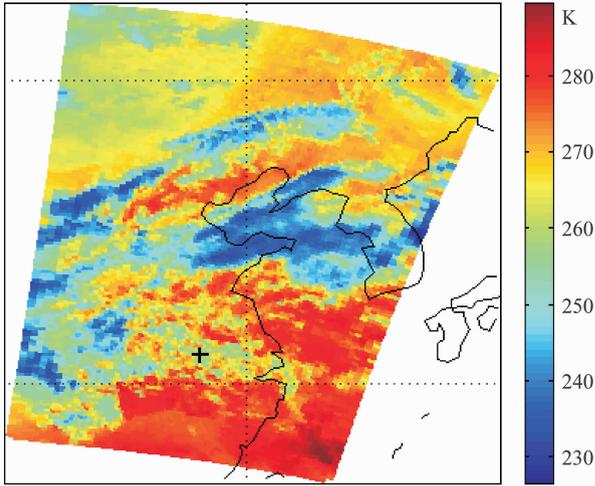


图3 2004年3月28日 AIRS 景 180 观测的窗区亮度温度图 (波数 900 cm^{-1})。“+”为合肥站位置

Fig. 3 AIRS granule 180 brightness temperature measurements at 900 cm^{-1} channel on 28 Mar 2004. Mark “+” is the location of Hefei station

地面或海面的光谱特征,同时在这个景中包含较暖的水云和半透明的冰云(亮温约从 $260\sim 280\text{ K}$)。

分别采用上述两种方案,用 MLEV 算法反演云高。图 4 给出了反演结果,图 4a 为用业务的晴空订正辐射强度及大气廓线反演的云顶高度,图 4b 是用 ECMWF NWP 的大气廓线客观分析场反演的云顶高度,图 4c 则显示了 MODIS 的业务云高产品。图 4 中白色区域多是晴空区,没有云存在,自然也就没有云参数,也有可能是因为 MLEV 反演不成功,没有通过质量控制。在图 4a 中,还有一部分空白区是晴空辐射订正失败视野点。从图 4a、b 中可看出,用两种不同方案得到的云高差别在 $20\sim 50\text{ hPa}$,而且与 MODIS 的二级业务云高产品(图 4c)吻合得很好。从直观上看方案 1 的反演结果与 MODIS 产品更接近些,局部区域 AIRS 反演的云顶高度比 MODIS 产品偏高。一般而言,窗区亮温图(图 3)中值越低云顶高度越高,相反,如果

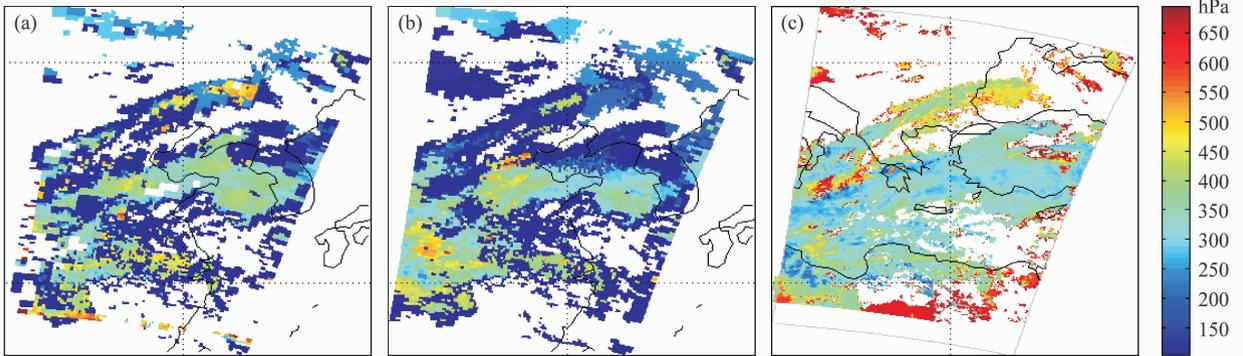


图4 (a) 由 AIRS 业务晴空辐射强度及大气廓线反演的单层云高; (b) 由 ECMWF NWP 的客观分析场反演的云高; (c) MODIS 云顶高度产品
Fig. 4 Single layer effective cloud height derived from (a) AIRS cloud cleared radiances and soundings, and (b) ECMWF NWP analysis profiles; (c) MODIS cloud top pressure products

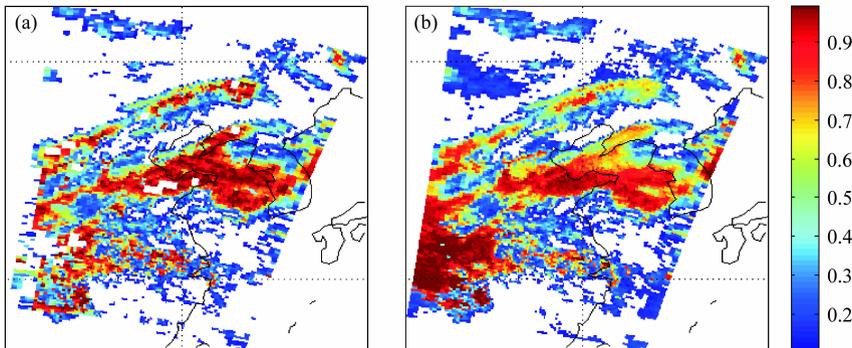


图5 (a) 由 AIRS 业务晴空辐射强度及大气廓线反演的 900 cm^{-1} 单层有效云比辐射率; (b) 由 ECMWF NWP 的客观分析场反演的有效云比辐射率

Fig. 5 Single layer effective cloud emissivity for 900 cm^{-1} band derived from (a) AIRS cloud cleared radiances and soundings, and (b) ECMWF NWP analysis profiles

窗区亮温值高往往意味着云顶高度就低, 当然还与云的光学厚度等有关。用窗区亮温可以从直观上初步验证反演的云高结果的正确性。

进一步比较反演的云比辐射率谱, 如果 MLEV 算法合理, 两种方案应得到较一致的云比辐射率谱特征。图 5 显示了用 MLEV 算法反演的窗区通道 (波数 900 cm^{-1}) 的有效云比辐射率, 图中白色区域存在的原因与图 4 中相同。图 5a 由晴空订正的辐射强度和大气廓线反演得到, 图 5b 则来自 ECMWF NWP 模式客观分析场。对比图 5a、b, 可看出用两种方案反演的有效云比辐射率分布非常接近, 而且有效云比辐射率值过渡连续、自然。图 5 中有效云比辐射率值红色 (接近 1) 时, 说明在该 AIRS 观测视场中完全被云覆盖, 蔽光而且云层较厚, 比较低的有效云比辐射率值往往意味着要么是半透明的云, 要么视场部分被云覆盖, 云量较小。

对同一个 AIRS 视野, 将 MLEV 两种方案的反演场进行相互对比可确保得到的云特性信息的准确性, 且反演结果与窗区观测亮温给出的云参数信息一致, 说明用 MLEV 算法反演云顶高度和有效云比辐射率谱是非常有效的。

由于篇幅有限, 论文中仅以 3 月 28 日 AIRS 景 180 为例给出了反演的云顶高度及有效云比辐射率分布图, 略去了其余两个时次的。表 1 则列出了这三个 AIRS 观测景中合肥站的 MLEV 云顶高度反演结果及 MODIS 反演的云高, 与图 2 中相应时刻激光雷达观测的云顶高度进行比较, 这三天中 18 时左右云顶高度差不多都在 6 km (约 460 hPa) 左右, 30 日时云顶高度稍低, 约在 5.4 km (约 500 hPa), 与 AIRS 两种方案反演的云顶气压都差不多, 进一步验证了利用红外高光谱资料用 MLEV 算法反演云顶高度的可行性。

表 1 反演的云顶高度的对比

Table 1 Comparison of retrieved cloud top pressures

观测时间	云顶高度 (方案 1)	云顶高度 (方案 2)	MODIS 云产品
2004-03-26T18:15	424 hPa	391 hPa	425 hPa
2004-03-28T18:01	460 hPa	442 hPa	435 hPa
2004-03-30T17:50	535 hPa	516 hPa	520 hPa

4 结论

MLEV 是一种相对简单的物理算法, 利用对

云敏感的长波红外辐射观测值来同时反演云高和云有效比辐射率谱, 最佳的云高和比辐射率谱解使得比辐射率谱的局部变化最小, 该算法适用于高光谱 (光谱分辨率从 $0.25\sim 1\text{ cm}^{-1}$) 的大气红外探测器。

通过与激光雷达观测和 MODIS 业务云产品的对比验证, 说明对卫星红外高光谱观测资料采用 MLEV 算法, 同时反演单层云的云顶高度和云有效比辐射率谱是非常有效的, 尤其是对中高云。

参考文献 (References)

- [1] 李响英, 宇如聪. AREM 模拟云参数与卫星观测的比较研究. 大气科学, 2006, **30** (6): 1198~1206
Li Yunying, Yu Rucong. Comparison of cloud parameters between AREM simulation and satellite retrieval. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (6): 1198~1206
- [2] 陈洪滨. 关于云和云天大气对太阳辐射的吸收异常. 大气科学, 1997, **21** (6): 751~757
Chen Hongbin. On the anomalous absorption of solar radiation by water clouds and by the cloudy atmosphere. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1997, **21** (6): 751~757
- [3] 吕达仁, 王普才, 邱金桓, 等. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾. 大气科学, 2003, **27** (4): 552~566
Lu Daren, Wang Pucui, Qiu Jinhuan, et al. An overview on the research progress of atmospheric remote sensing and satellite meteorology in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (4): 552~566
- [4] 邱金桓, 陈洪滨, 王普才, 等. 大气遥感研究展望. 大气科学, 2005, **29** (1): 131~136
Qiu Jinhuan, Chen Hongbin, Wang Pucui, et al. A prospect on future atmospheric remote sensing. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (1): 131~136
- [5] 邱金桓, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 现代大气物理学研究进展. 大气科学, 2003, **27** (1): 628~652
Qiu Jinhuan, Lu Daren, Chen Hongbin, et al. Modern research progresses in atmospheric physics. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (1): 628~652
- [6] Smith W L, Platt C. Intercomparison of radiosonde, ground-based laser, and satellite-deduced cloud heights. *J. Appl. Meteor.*, 1978, **17**: 1796~1802
- [7] Menzel W P, Smith W L, Stewart T R. Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1983, **22**: 377~384
- [8] Eyre J R, Menzel W P. Retrieval of cloud parameters from satellite sounder data: A simulation study. *J. Appl. Meteor.*, 1989, **28**: 267~275
- [9] Li J, Menzel W P, Schreiner A J. Variation retrieval of cloud parameters from GOES sounder long wave cloudy radiance

- measurements. *J. Appl. Meteor.*, 2001, **40**: 312~330
- [10] Susskind J, Barnet C, Blaisdell J. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2003, **41** (2): 309~409
- [11] Huang J, Qiu C J, Ma G, et al. Estimating the retrievability of temperature profiles from satellite infrared measurements. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, **23** (2): 224~234
- [12] Huang H L, Smith W L, Li J, et al. Minimum local emissivity variance retrieval of cloud altitude and effective emissivity—Simulation and initial verification. *J. Appl. Meteor.*, 2004, **43**: 795~809
- [13] Strow L L, Hannon S E, Motteler H E. An overview of the AIRS radiative transfer model. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2003, **41** (2): 303~313
- [14] Wu X B, Li J, Zhang W J, et al. Atmospheric profile retrieval with AIRS data and validation at the ARM CART site. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, **22** (5): 647~654