

基于卫星红外遥感的云顶高度反演算法综述

樊宏杰^{1,2} 黄亦鹏¹ 李万彪^{1,†}

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2. 63892 部队, 洛阳 471003;

† 通信作者, E-mail: lwb@pku.edu.cn

摘要 针对近年来利用卫星可见和红外波段遥感数据反演云顶高度的算法, 对国内外研究进展和存在的问题进行综述。首先, 主要介绍以红外窗区和 CO₂ 吸收技术为主的红外波段反演算法; 在此基础上, 进一步介绍目前相关国家和地区的业务算法, 对这些方法在实际应用中的优缺点予以评述, 提出针对中国地区云顶高度反演的解决方案。将来, 有发展前途的方法为基于红外分裂窗的查算表法, 利用静止卫星的分裂窗数据及极轨卫星云廓线雷达数据, 建立基于分裂窗亮温差和 11 μm 通道亮温的云顶高度查算表, 根据分裂窗亮温差和 11 μm 亮温查表得到云顶高度。

关键词 卫星红外遥感; 云顶高度; 反演算法; 红外分裂窗

中图分类号 P407

Overview of Retrieval Algorithm of Cloud-Top Height Based on Satellite Infrared Remote Sensing

FAN Hongjie^{1,2}, HUANG Yipeng¹, LI Wanbiao^{1,†}

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. 63892 Troop, Luoyang 471003; † Corresponding author, E-mail: lwb@pku.edu.cn

Abstract According to recent years cloud top-height inversion algorithms using satellite visible and infrared remote sensing data, domestic and foreign algorithm research progress and problems are summarized. Through the analysis of large number of related literatures, the inversion algorithms of the infrared window methods and CO₂ absorption technique are mainly introduced. On the basis of these algorithms, the current business algorithms in countries and regions are expressed. Then the advantages and disadvantages of these methods in application are reviewed, and the cloud top-height inversion solution for regions in China is present. In the future, the method of cloud top-height lookup tables based on infrared split-window is prospective. In application and research, lookup tables based on brightness temperature difference and 11 μm channel brightness temperature are constructed using split-window data of stationary satellite and cloud profile radar data of polar orbit satellite, and cloud top-height can be acquired by checking lookup tables by split-window brightness temperature difference and 11 μm channel brightness temperature in application.

Key words satellite infrared remote sensing; cloud-top height; retrieval algorithm; infrared split-window

云顶高度及云的辐射特性会影响地气辐射的收支, 对大气能量收支平衡具有显著的调节作用, 同时云顶高度等参数在航空气象保障、数值天气预报等领域也有重要体现, 因此确定云顶高度等参数对于大气物理及气候研究、气象保障等方面具有重要

的现实意义。云顶参数主要包括云顶高度、云顶气压、云顶温度、有效发射率、光学厚度和云相态等, 这些参数一般难以直接测量, 必须基于相关的可测物理量进行反演后才能得到。目前基于卫星红外遥感的云顶高度反演就是一种广泛使用的手段。

卫星遥感技术可为研究人员提供不同波段的云图数据,包括可见、短波和长波红外、微波、水汽云图等图像数据。在利用卫星红外遥感数据在云顶高度反演方面,国内外都进行了相关的研究工作。

利用卫星红外遥感数据反演云参数的研究工作开始于 20 世纪 70 年代。国外较早地开展了利用卫星遥感数据反演云顶高度的研究,形成一些成熟的算法,并应用于遥感卫星产品中。国内学者也针对这些方法进行了应用研究及改进工作,大多集中在利用现有的卫星云产品进行一些统计工作方面^[1-5]。本文主要介绍利用卫星红外遥感数据反演云顶高度的算法原理、过程以及进展,主要包括以红外窗区和 CO₂ 吸收技术为主的红外波段反演算法。在这些算法的基础上,进一步介绍目前相关国家和地区的业务算法,并对这些算法在实际应用中的优缺点予以评述,提出针对中国地区云顶高度反演的解决方案。

1 红外窗区为主的算法

1.1 单红外窗区法

单红外窗区法^[6-10]主要利用大气红外窗区(3~5 μm 和 8~14 μm 窗区通道)中某一通道的辐射数据来确定云顶高度。该方法假定云的发射率为 1,即将云层当做黑体,且云的散射及云顶上方的辐射和吸收均可忽略,将卫星测得的辐射近似为云顶的辐射,即 $I_\lambda = B_\lambda(T_c)$, 其中 I_λ 为辐射亮度测量值, $B_\lambda(T_c)$ 为温度 T_c 下的黑体辐射亮度。首先根据卫星测量的辐射亮度,利用普朗克公式解算得到云顶亮温,然后由云顶亮温与大气温度廓线(当地测量的廓线数据或通过 NCEP/NCAR 及其他数值模式预报的廓线数据)对比得到云顶高度,因此该方法又称为亮温对比法。常用的窗区通道为 11 μm 红外窗,包括两个通道:长波红外通道一(10.3~11.3 μm, 简称 11 μm 通道)和长波红外通道二(11.5~12.5 μm, 简称 12 μm 通道)。在 GOES, FY-2C/E 和 Himawari 等系列卫星上均有相同或类似通道的探测器。

单红外窗区法是反演云顶高度最为直接和简单的方法。由于将云层当做黑体来处理,忽略了云的透过率及云顶大气消弱的影响,因此该方法仅适合于较高的不透明云。对于较低的云层、半透明云及亚像元云层(云层未充满传感器像元视场)会出现较大的估计偏差,半透明云和亚像元云的云顶温度往往会被高估,云顶高度会被低估。

对于该方法, Menzel 等^[6]、Smith 等^[8]、Schreiner 等^[9]以及 Nieman 等^[10]分别做了详细的分析,并与其他方法进行比较,均得到单红外窗区法对云顶平均高度的低估偏差通常在 100 hPa 以上,其中 Schreiner 等^[9]还特别针对卷云的云顶高度进行反演,并做统计分析,得到卷云云顶高度的低估偏差达到 350 hPa 以上。因此,他们指出该方法通常用于较高的不透明云(顶部气压低于 600 hPa 的不透明云)。

1.2 红外窗混合算法

1.2.1 太阳光反射率-红外窗区法

太阳光反射率-红外窗区法^[11-12]是利用 0.2~4 μm 波段通道和 8~12 μm 红外窗口通道反演卷云的云顶高度。单红外窗区法对于半透明云和亚像元云的云顶高度估计偏差较大,根本原因是云层的有效发射率无法准确估计,为了解决这一问题,Shenk 等^[11]提出太阳光反射率-红外窗区法,该方法是对单红外窗区法的修正,由云层对太阳光的反射辐射估计云的覆盖率,由覆盖率和红外通道测量值得到云的红外辐射和大气廓线数据来估计云顶高度。

卫星探测器接收到的辐射亮度包含云自身的辐射亮度、透过云层的云下背景辐射亮度、云上大气路径辐射亮度和像元视场中非云区的晴空辐射亮度(云未充满探测器视场时需要考虑)。探测器接收到的辐射亮度 I 可用下式表示:

$$\begin{aligned} I &= N\epsilon B_{\text{cld}}t(p_c, 0) + N(1 - \epsilon)I'_{\text{clr}}t(p_c, 0) + \\ &NI_{\text{path}}(p_c, 0) + (1 - N)I_{\text{clr}} \\ &= \epsilon'I_{\text{cld}} + (1 - \epsilon')I_{\text{clr}} \\ &= I_{\text{clr}} + \epsilon'(I_{\text{cld}} - I_{\text{clr}}), \end{aligned} \quad (1)$$

$I_{\text{cld}} = B_{\text{cld}}t(p_c, 0) + I_{\text{path}}(p_c, 0)$ 表示卫星探测器接收到的黑体云云顶辐射亮度加云上大气辐射亮度; $I_{\text{clr}} = I'_{\text{clr}}t(p_c, 0) + I_{\text{path}}(p_c, 0)$ 表示晴空辐射亮度; B_{cld} , I'_{clr} 和 $I_{\text{path}}(p_c, 0)$ 分别表示同云温黑体辐射亮度、云下背景辐射亮度和云上大气辐射亮度; $t(p_c, 0)$ 表示云顶到大气层顶的透过率; N 表示像元中云覆盖率; ϵ 表示云的发射率, ϵ' 表示有效发射率, $\epsilon' = N\epsilon$ 。

式(1)中 I_{cld} 和 I_{clr} 可用下列公式表示:

$$I_{\text{clr}} = B(T_g)t(p_g, 0) + \int_{p_g}^0 B(p) \frac{\partial t(p, p_c)}{\partial p} dp, \quad (2)$$

$$I_{\text{cld}} = B(T_c)t(p_c, 0) + \int_{p_c}^0 B(p) \frac{\partial t(p, p_c)}{\partial p} dp. \quad (3)$$

式中, T_g 和 p_g 分别表示地表温度和气压; T_c 和 p_c 分别表示云顶温度和气压。

I_{cld} 和 I_{clr} 可以通过国际上流行的大气辐射传输模式来计算, 主要有 LOWTRAN, MODTRAN 和 6S 等模式, 目前常用的是 MODTRAN 模式。MODTRAN 从 LOWTRAN 发展而来, 是一种中光谱分辨率大气辐射传输模式, 是美国空军地球物理实验(AFGL)开发的计算大气透过率及辐射的软件包。MODTRAN 提高了 LOWTRAN 的光谱分辨率, 改进了多次散射的算法等, 通过对几何路径、大气模式、气溶胶模式、传感器特性和地表特性进行设置, 可用于计算大气路径透过率、路径的散射辐射和路径大气热辐射等。MODTRAN 反演云顶高度的过程如下。

1) 利用 0.2~4 μm 波段卫星图像亮度、卫星观测角和太阳天顶角计算云的覆盖率 N , 计算公式^[12]如下:

$$I_{\text{sun, meas}} = (1-N)\rho_{\text{clr}}I_{\text{sun}} + N\rho_{\text{cld}}I_{\text{sun}}, \quad (4)$$

$$N = \frac{I_{\text{sun, meas}} - \rho_{\text{cld}}I_{\text{sun}}}{I_{\text{sun}}(\rho_{\text{cld}} - \rho_{\text{clr}})}, \quad (5)$$

式中, $I_{\text{sun, meas}}$ 表示探测器接收到的反射太阳辐射亮度; I_{sun} 表示大气层外太阳辐射亮度(假设在不同层的取值相同); ρ_{clr} 表示晴空太阳辐射双向反射率, 其值由下垫面类型决定; ρ_{cld} 表示云层太阳辐射双向反射率。

2) 假设云(水)的红外发射率为 0.9, 晴空辐射亮度 I_{clr} 由探测器接收的云图数据得到, 通过式(1)、 I_{clr} 和 N 得到 I_{cld} , 计算公式^[12]如下:

$$I_{\text{cld}} = \frac{I - I_{\text{clr}}}{N\varepsilon} + I_{\text{clr}}. \quad (6)$$

3) 根据大气廓线数据, 可以利用式(3)或者 MODTRAN 大气辐射模式, 计算得到一系列辐射亮度值 $I'_{\text{cld}}(T_{\text{c}, i})$ (理论计算值, 其中 $T_{\text{c}, i}$ 表示大气廓线数据分层温度)。

4) 用 $\chi(T_{\text{c}, i}) = |I'_{\text{cld}}(T_{\text{c}, i}) - I_{\text{cld}}|$ 表示理论计算值与测量计算值之间的误差, 由大气廓线数据计算得到一系列 $\chi(T_{\text{c}, i})$ 值。当 $\chi(T_{\text{c}, i})$ 取最小值时, 对应的大气廓线分层温度 $T_{\text{c}, 1}$ 为云顶温度, 对应的高度为云顶高度。

太阳光反射率-红外窗区法依赖于云在可见光波段的反射率和红外波段的发射率, 因此最大的缺点是只适用于白天, 不适用于夜晚, 但反演精度比

单红外窗区法高。Shenk 等^[11]利用该方法得到卷云的云顶高度反演偏差在 ± 50 hPa 范围内; 云层发射率越高, 精度越高。Reynolds 等^[12]利用该方法反演云顶高度得出非卷云云层的云顶高度反演偏差为 0.5 km, 卷云的云顶高度反演偏差为 1.1 km。

1.2.2 H₂O-红外窗区法

H₂O-红外窗区法^[6,8-10,13]又称线性外推法或 H₂O-红外窗截距法, 指利用 5.7~7.1 μm H₂O 吸收通道和 10.5~12.5 μm 红外窗区通道辐射计算卷云云顶高度。将式(1)分别应用于 H₂O 吸收通道和红外窗区通道:

$$I_{6.7}(T_{6.7}) = I_{6.7}(T_F) + \varepsilon'_{6.7}[I_{6.7}(T_{\text{cld}}) - I_{6.7}(T_F)], \quad (7)$$

$$I_{11}(T_{11}) = I_{11}(T_G) + \varepsilon'_{11}[I_{11}(T_{\text{cld}}) - I_{11}(T_G)], \quad (8)$$

式中, 下角标 6.7 和 11 分别表示水汽通道和红外窗区通道, $T_{6.7}$ 和 T_{11} 分别表示两个通道的亮温, T_F 和 T_G 分别表示两个通道的晴空亮温, T_{cld} 表示云顶温度, $I_{6.7}(T_{6.7})$ 和 $I_{11}(T_{11})$ 分别表示两个通道的辐射亮度测量值, $I_{6.7}(T_F)$ 和 $I_{11}(T_G)$ 分别表示两个通道的晴空辐射亮度, $I_{6.7}(T_{\text{cld}})$ 和 $I_{11}(T_{\text{cld}})$ 分别表示两个通道的黑体云辐射亮度, $\varepsilon'_{6.7}$ 和 ε'_{11} 分别表示两个通道的有效发射率。

两个通道的有效发射率近似相等, 即 $\varepsilon'_{6.7} \approx \varepsilon'_{11}$, 消去式(7)和(8)中 $\varepsilon'_{6.7}$ 和 ε'_{11} , 得到

$$I_{6.7}(T_{6.7}) = aI_{11}(T_{11}) + b, \quad (9)$$

$$a = [I_{6.7}(T_{\text{cld}}) - I_{6.7}(T_F)] / [I_{11}(T_{\text{cld}}) - I_{11}(T_G)], \quad (10)$$

$$b = [I_{6.7}(T_F)I_{11}(T_{\text{cld}}) - I_{6.7}(T_{\text{cld}})I_{11}(T_G)] / [I_{11}(T_{\text{cld}}) - I_{11}(T_G)]. \quad (11)$$

用 L_1 表示式(9)对应的曲线, 通过测量得到同一块卷云多个区域的两通道辐射亮度值, 则可确定 a, b 值, 得到 L_1 的表达式。

另外, 当云层为黑体云(即云层的两通道有效发射率为 1)时, 从式(7)和(8)得到 $T_{6.7} = T_{11} = T_{\text{cld}}$, 相应地, 两通道的辐射亮度可表示为 $I_{6.7}(T_{\text{cld}})$ 和 $I_{11}(T_{\text{cld}})$, 两者之间的关系可用下式表示:

$$I_{6.7}(T_{\text{cld}}) = fI_{11}(T_{\text{cld}}), \quad (12)$$

式中, f 表示两通道辐射亮度比。用 L_2 表示式(12)对应的曲线, 通过计算一系列 T_{cld} 值下的 $I_{6.7}(T_{\text{cld}})$ 和 $I_{11}(T_{\text{cld}})$, 即可得到 L_2 曲线(T_{cld} 取值范围可为 200~300 K, 或按照大气廓线温度数据取值)。

L_1 和 L_2 相交处的亮温值即为实际的云顶温度, 由大气廓线数据即可得到云顶高度。实际应用时, 可按以下步骤计算云顶高度。

1) 根据温度廓线, 用普朗克公式计算出一系列两个通道不同温度下的辐射亮度值, 得到曲线 L_2 。

2) 根据两个通道实测图像数据中对两个点或多个点的辐射亮度值得到曲线 L_1 。

3) 计算 L_1 和 L_2 的交点对应的亮温, 即为云顶温度。

4) 比较大气温度廓线数据, 得到云顶高度。

1981 年, Szejwach^[13]首次利用 H_2O 吸收通道和红外窗区通道对卷云云顶亮温进行反演, 然后与水汽通道和红外通道两个单独通道获得的亮温做比较, 结果显示 H_2O -红外窗区法反演结果更接近云顶高度处的温度, 并指出该方法在反演云顶高度的应用前景。其后, Menzel 等^[6]和 Nieman 等^[10]分别对 H_2O -红外窗区法做了详细的分析, 并与其他方法比较, 均得到 H_2O -红外窗区法在云顶平均高度估计中的偏差通常在 60~110 hPa 之间的结论。Schreiner 等^[9]利用 H_2O -红外窗区法得到云顶高度的估计偏差在 80 hPa 以内。Smith 等^[8]同样做了分析比较, 得出 H_2O -红外窗区法优于单红外窗区法, 稍次于 CO_2 吸收技术。

因此可知, H_2O -红外窗区法反演精度在 60~110 hPa 之间, 优于单红外窗区法, 稍次于太阳光反射率-红外窗区法和 CO_2 吸收技术, 但相对于太阳光反射率-红外窗区法, 具有不受时间限制的优点。由于 H_2O -红外窗区法利用了水汽吸收通道, 因此在反演较低云顶高度时会受到限制, 并且从反演步骤 2 可以看出, 反演时要求云层能够充满多个像元视场, 因此该方法不适用于尺度过小的云层。

1.3 红外分裂窗查算表算法

红外分裂窗查算表算法^[14-19]是利用长波红外的分裂窗通道(11 μm 通道和 12 μm 通道)数据和主动式高精度设备测量得到的云参数数据, 联合建立云顶高度查算表。其中分裂窗通道提供云层的 11 μm 通道亮温及两通道的亮温差值(用 BT D 表示, 通常用 11 μm 通道亮温减去 12 μm 通道亮温), 主动式高精度测量设备提供云层的垂直结构信息, 以获取云顶高度参考值。

利用分裂窗所基于的物理基础是: 1) 在两个通道, 低层云或厚云(如积云、积雨云和层积云)的发射率是一致的, 可以看做发射率为 1 的黑云; 2) 在

两个通道, 卷云的发射率比较小, 且存在差别; 3) 在红外窗主要是水汽的少量吸收, 在 12 μm 通道的吸收比 11 μm 通道的吸收更大一些。

两个通道的发射率有如下关系^[15]:

$$\varepsilon'_{12} = 1 - (1 - \varepsilon'_{11})^{1.08}, \quad (13)$$

其中, ε'_{11} 和 ε'_{12} 分别表示两个通道的有效发射率。

利用式(1), 用 11 μm 通道值减 12 μm 通道值得到:

$$\begin{aligned} \Delta I_{11-12} &= I_{11} - I_{12} \\ &= (I_{\text{clr}, 11} - I_{\text{clr}, 12}) + \\ &\quad (\varepsilon'_{11} I_{\text{cld}, 11} - \varepsilon'_{12} I_{\text{cld}, 12}) - \\ &\quad (\varepsilon'_{11} I_{\text{clr}, 11} - \varepsilon'_{12} I_{\text{clr}, 12}) \\ &= \Delta I_{\text{clr}} + \varepsilon'_{11} (\Delta I_{\text{cld}} - \Delta I_{\text{clr}}) + \\ &\quad \Delta \varepsilon' (I_{\text{cld}, 11} - I_{\text{clr}, 12}), \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $I_{\text{clr}, 11}$ 和 $I_{\text{clr}, 12}$, $I_{\text{cld}, 11}$ 和 $I_{\text{cld}, 12}$ 分别表示两个通道的晴空辐射亮度和黑体云辐射亮度; $\Delta I_{\text{clr}} = I_{\text{clr}, 11} - I_{\text{clr}, 12}$, 为两通道晴空辐射亮度差; $\Delta I_{\text{cld}} = I_{\text{cld}, 11} - I_{\text{cld}, 12}$, 为两通道黑体云辐射亮度差; $\Delta \varepsilon' = \varepsilon'_{11} - \varepsilon'_{12}$, 为两通道有效发射率差。可做如下分析。

1) 当云层较厚(如积云、层积云和积雨云)时, 可以看做黑云, 发射率相同(近似为 1), 即 $\varepsilon'_{11} = \varepsilon'_{12} = 1$, $\Delta \varepsilon' = 0$, $\Delta I_{11-12} = \Delta I_{\text{cld}}$, 在红外窗区两个通道辐射亮度近似相等, 则有 $\Delta I_{11-12} = 0$ 。

2) 对于晴空来说, $\varepsilon'_{11} = \varepsilon'_{12} = 0$, $\Delta I_{11-12} = \Delta I_{\text{clr}}$, 在红外窗区主要是水汽的少量吸收, 在 12 μm 通道的吸收比 11 μm 通道的吸收更大一些, 则在晴空的两个通道 ΔI_{clr} 与水汽的含量(与路径长度正相关)有关, 路径越长, ΔI_{clr} 越大, 因此晴空 BT D 值一般为正而不为 0。

可以看出, 如积状云的厚度较大, 含水量高, 透过率很小, 发射率大, 则 BT D 值小; 当为卷状云时, 透过率较大, 有效发射率较小, 则 BT D 值较大; 对于晴空来说, 云有效发射率为 0, ΔI_{clr} 不为 0, 则 BT D 为正值。在陆地上时, 湿度的减少会使得 ΔI_{clr} 变小, 则 BT D 值变小, 相当干燥的地方接近 0。这样, 不同的 BT D 值可以反映不同的云层类型, 不同类型的云层具有不同的云顶高度。同样, 不同的亮温也反映不同的云顶高度, 那么云顶高度则随 BT D 和 11 μm 通道亮温具有一定的分布规律。利用主动式高精度测量方法得到的云参数数据, 联合

两通道亮温差和 $11\ \mu\text{m}$ 通道亮温, 即可建立云顶高度查算表, 在获取云顶高度时就可以利用该表进行反演, 从分裂窗数据获取两通道亮温差值和 $11\ \mu\text{m}$ 通道亮温值, 比对查算表, 即可获取云顶高度。红外分裂窗查算表算法反演云顶高度步骤如下。

1) 选取若干年遥感卫星分裂窗图像数据和载有主动遥感探测器的卫星数据(如 $94\ \text{GHz}$ 的星载毫米波或星载激光云廓线雷达数据), 红外图像数据与主动遥感数据序列在时间和空间上一一对应。

2) 从主动遥感数据(云产品数据)得到云顶高度数据, 从分裂窗图像数据计算得到 BTD 值和 $11\ \mu\text{m}$ 通道亮温值。

3) 将云高数据、BTB 值和 $11\ \mu\text{m}$ 通道亮温值一一对应, 进行填充处理, 建立查算表。

4) 由预处理后的分裂窗图像, 计算得到 BTB 值和 $11\ \mu\text{m}$ 通道亮温值, 与建立的查算表比对, 得到相应的云顶高度。

红外分裂窗最先被 Inoue^[14-15]用于热带海洋上空云的检测分类(利用 NOAA7-AVHRR 数据)。刘诚等^[19]也利用红外分裂窗对中纬度陆地上空云进行分类检测。反演云顶高度的红外分裂窗查算表算法由 Hamada 等^[17-18]首先提出, 他们 2008 年利用 GMS-5 红外分裂窗数据及地基雷达测量的云参数建立查算表^[17], 但是仅适用于非降水云; 然后在 2010 年又利用 MTSAT 卫星红外分裂窗数据和 Cloudsat 卫星云参数数据建立热带海洋上空的强对流云的云顶高度反演查算表^[18], 利用查算表估计云顶高度偏差小于 $1\ \text{km}$ (云顶亮温在 $240\ \text{K}$ 左右)。

该方法可用于全天候不同时段云顶高度的反演, 但是其精度受到纬度、昼夜、季节及卫星天顶角等因素的影响, 要提高反演云顶高度的精度, 则需要在建立查算表时最大限度地降低这些因素的影响, 可针对不同纬度、昼夜、不同季节分别建立相应的查算表。

2 CO_2 吸收技术

CO_2 吸收技术^[6,8-10,20-40](CO_2 Absorption Technique, CO_2AT)是到目前为止研究及使用较广泛的反演云顶高度的方法。利用 CO_2 吸收带反演云顶高度有两种方法: 辐射比值法(或称 CO_2 切片法)和辐射余差法(包括均方根值法、Chahine 辐射余差法和 MLEV 法)。使用的波带包含 14.2 、 13.9 和 $13.61\ \mu\text{m}$

的 CO_2 吸收带及 $11\ \mu\text{m}$ 红外窗区。

2.1 辐射比值法

从探测器测量得到的云层辐射亮度中减去晴空辐射亮度, 可以利用以下公式:

$$I - I_{\text{clr}} = \varepsilon'(I_{\text{clr}} - I_{\text{clr}})。(15)$$

如果使用同一视场中两个相邻的探测器通道, 云量相同, 发射率近似相等, 可得有效发射率相等, 则有下式:

$$\begin{aligned} f(\lambda_1, \lambda_2, p_c) &= \frac{I(\lambda_1) - I_{\text{clr}}(\lambda_1)}{I(\lambda_2) - I_{\text{clr}}(\lambda_2)} \\ &= \frac{\varepsilon'(\lambda_1)[I_{\text{clr}}(\lambda_1) - I_{\text{clr}}(\lambda_1)]}{\varepsilon'(\lambda_2)[I_{\text{clr}}(\lambda_2) - I_{\text{clr}}(\lambda_2)]} \\ &= \frac{\int_{p_s}^{p_c} t_{\lambda_1}(p, 0) \frac{\partial B(p)}{\partial p} dp}{\int_{p_s}^{p_c} t_{\lambda_2}(p, 0) \frac{\partial B(p)}{\partial p} dp} \\ &= f(\lambda_1, \lambda_2, p), \end{aligned} \quad (16)$$

其中, λ_1 和 λ_2 分别表示两个通道的响应波长, $I(\lambda_1)$ 和 $I(\lambda_2)$ 分别表示两个通道测量的云层辐射亮度, $I_{\text{clr}}(\lambda_1)$ 和 $I_{\text{clr}}(\lambda_2)$ 分别表示两个通道测量的晴空辐射亮度, p_s 和 p_c 分别表示地面和云顶气压, $t_{\lambda_i}(p, 0)$ 表示气压为 p 处至大气层顶的垂直方向大气透过率; $f(\lambda_1, \lambda_2, p_c)$ 和 $f(\lambda_1, \lambda_2, p)$ 分别表示测量数据和理论计算数据下的比值函数。这样, 在已知两个通道的测量值及大气温度和透过率廓线的基础上, 就可以求出云顶高度。计算步骤如下。

1) 由两个通道的图像数据, 得到两个通道的观测亮度值和晴空亮度值。

2) 由两个通道的观测亮度和晴空亮度, 计算比值函数 $f(\lambda_1, \lambda_2, p_c)$ 。

3) 由温度廓线和透过率廓线, 计算比值函数 $f(\lambda_1, \lambda_2, p)$ 。

4) 计算 $|f(\lambda_1, \lambda_2, p_c) - f(\lambda_1, \lambda_2, p)|$ 最小值对应的 p , 即为云顶气压 p_c 。

5) 比对大气廓线数据, 得到云顶高度。

辐射比值法由 Smith^[20]于 1968 年提出, 然后将其用于云顶高度等参数的反演工作^[21-22], 高度反演结果与激光雷达、无线电探测仪测量结果匹配较好。Menzel 等^[23-25]利用该方法反演云顶高度的误差为 $50\ \text{hPa}$ 。Menzel 等^[6]、Smith 等^[8]、Schreiner

等^[9]以及 Nieman 等^[10]都对 11 μm 窗区法、 CO_2 比值法和 H_2O -11 μm 窗区法反演云顶高度做了比较, 得到辐射比值法的反演误差在 60~110 hPa 之间, 均得出 CO_2 切分法反演精度在 3 种方法中最高的结论。Baum 等^[26]发现在两层云(底层为不透明云)的情况下, 利用辐射比值法反演的结果比较差。Wylie 等^[27]将 HIRS 反演的云顶高度(利用辐射比值法)与 SAGE-II 卫星测量结果进行比较, 发现二者之间存在 1.6 km 的偏差。Frey 等^[28]将 MAS 卫星反演的云顶高度(利用辐射比值法)与机载激光雷达测试结果进行比较, 得到 1/3 情况下偏差为 ± 500 m, 2/3 情况下偏差为 1500 m。Naud 等^[30]对 MODIS 反演的云顶高度(利用辐射比值法)与后向散射激光雷达测量结果进行比较, 得到高云误差范围为 -1.4~2.7 km, 低云误差范围为 -1.2~1.5 km。为了进一步提高 CO_2 比值法在多层云顶高度的反演精度, Holz 等^[31]在 CO_2 比值法基础上提出 CO_2 筛选法, 并与辐射比值法和 MLEV 算法结果做比较, 结果显示 CO_2 筛选法结果稍好一些。Chang 等^[32-33]在 CO_2 比值法基础上提出基于有效背景辐射的 MCO2AT 方法, 反演结果与 CALIOP (星载云和气溶胶正交极化激光雷达)测量结果相比, 辐射比值法的偏差为 2.5 km, MCO2AT 方法的偏差为 1 km。

利用辐射比值法反演云顶高度时, 如果通道的辐射与晴空辐射之间差值很小(小于仪器噪声), 该方法则不适用。这种情况常发生在低层的碎云和非常薄的卷云情况下。另外, 该方法对多层云的反演误差也较大。

2.2 辐射余差法

这一类方法包括均方根值法、Chahine 辐射余差法和 MLEV 法。

均方根值法通过计算测量值与理论计算值之间的均方根来反演云顶高度, 计算公式如下:

$$I_{\text{rms}}(p_c, \varepsilon') = \left\{ \sum_{i=1}^N [I_{\text{meas}}^i - I^i(p_c, \varepsilon')]^2 \right\}^{1/2}, \quad (17)$$

其中, $I_{\text{rms}}(p_c, \varepsilon')$ 表示 N 个通道的辐射亮度均方差; I_{meas}^i 表示第 i 个通道的辐射测量值; $I^i(p_c, \varepsilon')$ 表示第 i 个通道的理论计算辐射值。 $I_{\text{rms}}(p_c, \varepsilon')$ 取最小值时对应的 p_c 为云顶气压, 与大气廓线对比即可得到云顶高度。计算步骤如下。

- 1) 由红外图像数据得到所有通道的 I_{meas}^i 。
- 2) 由大气廓线数据, 利用式(2)计算得到所有

通道的 I_{clr}^i 。

3) 在其中一个通道(该通道权重函数 $dt/d(\ln p)$ 的峰值位置相对其他通道最低), 根据大气廓线数据, 选择一组可能的云顶气压 T_c 和 p_c , 由式(3)计算得到 I_{clr} 。

4) 由同一个通道下的 I_{clr}^i , I_{meas}^i 和 I_{clr} , 用下式计算得到有效发射率 ε' :

$$\varepsilon' = \frac{I_{\text{meas}}^i - I_{\text{clr}}^i}{I_{\text{clr}} - I_{\text{clr}}^i}, \quad (18)$$

ε' 与通道无关。

5) 在其余通道同一组 T_c 和 p_c 下, 由 ε' 并利用式(1)~(3)计算得到 $I^i(p_c, \varepsilon')$ 。

6) 根据 I_{meas}^i 和 $I^i(p_c, \varepsilon')$, 通过式(4)计算 T_c 和 p_c 下的 $I_{\text{rms}}(p_c, \varepsilon')$ 。

7) 重复步骤 3 至步骤 6, 计算不同 T_c 和 p_c 下的 $I_{\text{rms}}(p_c, \varepsilon')$, 取其中最小值对应的 T_c 和 p_c , 比对大气廓线数据, 得到云顶高度。

Chahine 辐射余差法与均方根值法在本质上是—致的, 计算公式与式(17)稍有区别, 如下所示:

$$\chi(p_c, \varepsilon') = \left\{ \sum_{i=1}^N \left[\frac{I_{\text{meas}}^i - I^i(p_c, \varepsilon')}{I_{\text{meas}}^i} \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (19)$$

云顶高度与 $\chi(p_c, \varepsilon')$ 取最小值时的云顶气压 p_c 相对应。

MLEV 法由美国威斯康星大学开发, 与均方根法原理相同, 利用的是有效发射率的方差, 计算公式如下:

$$\text{LEV} = \sum_{i=1}^N [\varepsilon'_i(p_c) - \overline{\varepsilon'_i(p_c)}]^2, \quad (20)$$

其中, $\varepsilon'_i(p_c)$ 表示第 i 个通道的有效发射率, $\overline{\varepsilon'_i(p_c)}$ 表示 N 个通道有效发射率的平均值。LEV 取最小值时对应的 p_c 为云顶气压, 相应的高度为云顶高度。

Chahine^[37]1974 年首次将辐射余差法用于云顶气压及云高的反演, 得到单层云的云顶高度反演精度为 25 hPa。但是, Wielicki 等^[38]对这一方法(使用均方根值法, 等同于 Chahine 辐射余差法)进行重复试验, 结果显示, 只有在对 600 hPa 高度以上云顶高度的反演中, 精度才能达到 25 hPa。官莉等^[39]利用 MLEV 算法反演了云顶高度, 结果与激光雷达观测和 MODIS 业务云产品比较一致。

利用辐射余差法反演云顶高度时, 存在与辐射

比值法相同的问题。同时,在计算过程中要用到多个相邻通道的均值化处理,通道越多,误差越小,因此反演的精度会受到传感器在某一波长附近通道数的影响。

3 一些国家和地区的业务算法

3.1 美国

NASA (美国国家航空航天局)的卫星系列先后有 1960—1965 年的 TIROS (泰罗斯)系列极轨卫星,1964—1978 年的 Nimbus“雨云”系列极轨卫星,2002 年起的 A-Train 系列卫星;ESSA (美国国家环境科学管理局)1966—1969 年的系列极轨卫星;NOAA (美国国家海洋和大气管理局)的卫星系列有 1970—2009 年的极轨卫星系列(POES,即 NOAA 系列),1975 年开始的静止业务环境卫星系列(GOES 系列),以及 2011 年开始的 NPOESS“联合极轨卫星系统”系列卫星。

目前关于云参数反演的焦点在 GOES 系列卫星、NOAA 系列卫星和 A-Train 系列卫星。在红外波段及混合波段主要利用 VISSR 数据(GOES 1~3 星)、VAS 数据(GOES 4~7 星)、Imager & Sounder 数据(GOES 8~16 星)、AVHRR & HIRS 数据(NOAA 系列卫星)及 MODIS 数据(Aqua 卫星)。目前在红外波段,美国在反演云顶高度(或云顶气压)的业务上广泛应用的算法^[8-10]有基于单红外窗区的算法、H₂O-红外窗区法和 CO₂ 辐射比值法。

3.2 欧洲

欧洲 ESA (欧洲太空局)的主要气象卫星包括:静止轨道卫星主要是 1977—2012 年发射的 Meteosat 系列卫星(Meteosat 1~3, Meteosat 4~7 (即 MOP 1~4)和 Meteosat 8~10 (即 MSG 1~3));极轨轨道卫星主要是分别于 2006 年和 2012 年发射的 MetOp-A & MetOp-B (均载有 HIRS/4 和 AVHRR/3 传感器)。

作为静止卫星, Meteosat 是云参数反演的重要数据源。根据其通道特点,红外波段反演云顶参数已经业务化的算法有单红外窗法^[6-7]和 H₂O-红外窗区法^[10,13]。

3.3 日本

日本的主要气象卫星包括:静止气象卫星为 Himawari 系列卫星,分别是 1977—2003 年相继发射的“地球静止气象卫星”,即 GMS 系列卫星(GMS 1~5,即 Himawari 1~5)、接替 GMS 的“多用途运输卫星”MTSAT 系列星(MTSAT 1/2,即 Himawari

6/7)和 2014 年发射的 Himawari8。应用的主要对象为 MTSAT2 和 Himawari8,主要波段为可见、水汽和分裂窗波段。

日本 Himawari 系列卫星主要由美国承包研制并发射,业务上从美国继承了相应算法。近年来,日本京都大学 Hamada 等^[17-18]分别利用 GMS-5 和 MTSAT-1R 卫星数据发展了基于分裂窗数据反演云顶高度的查算表法。

3.4 中国

中国的静止气象卫星为 FY-2 系列星(FY-2A/B/C/D/E/F),极轨气象卫星为 FY-1 系列星(FY-1A/B/C/D)和 FY-3 系列星(FY-3A/B/C)。

风云卫星云产品的生成,在业务上主要利用 FY-2 系列卫星的红外窗和水汽通道数据,考虑到利用红外窗反演半透明云带来的误差,利用 H₂O-红外窗区法^[41]得到云顶温度。

4 目前存在的问题及解决方案设想

4.1 红外窗区方法存在的问题

1) 单红外窗区法。该方法适用于厚而稠密且完全充满视场的云层。对于部分云覆盖(亚像元)和薄云层或卷云而言,其有效发射率不为 1,云层下方的红外辐射能透过云层,此时卫星测得的云层辐射混叠了云层下方背景的辐射,云顶的亮度及亮温会被高估,云顶高度则被低估。

2) 太阳光反射率-红外窗区法。该方法依赖于云在可见光波段的反射率和红外波段的发射率,精度比红外窗区法高,但是短波波段双向反射率的取值以及不同层取相同的太阳辐射值的假设都会对计算精度产生影响,最大的缺点是只适用于白天,不适用于夜晚,同时当云的红外率越小时,估计偏差越大。

3) H₂O-红外窗区法。该方法利用 H₂O 吸收带通道,水汽云图主要反映对流层上部的辐射信息。当大气中相对湿度增大时,可观测的高度会相应上移,在反演云顶高度时受到大气湿度廓线的影响,因此该方法对中高云云顶高度的反演比较有效,对低云会失效,且不适用于尺度过小的云层。

4) 红外分裂窗查算表算法。该方法目前主要应用在热带海洋地区,由于海洋背景随时间和空间变化不大,比较均一,云类型阈值划分较简单一些,但是中纬度陆地上背景辐射随时间和空间比较多变,分布不均,阈值需要进行调整。该方法确定的

云顶高度偏差受纬度、太阳天顶角和季节等因素影响较大,在高纬度云顶高度估值明显偏低,而且受季节影响较大(夏季高于冬季),在大天顶角地方云顶高度同样估值偏低。在应用中要考虑这些因素的影响。

4.2 CO₂ 吸收技术存在的问题

1) 辐射比值法。当通道的辐射与晴空辐射差值很小(小于仪器噪声)时,该方法则不适用,常发生在低层的碎云、非常薄的卷云和高的不透明云等情况下。

2) 辐射余差法。该方法在计算过程中要用到多个相邻通道的均值化处理(要求云发射率在各通道近似相等),通道越多,误差越小,因此反演的精度会受到传感器在某一波长附近通道数的影响。

4.3 解决方案设想

分裂窗查算表法主要利用长波红外大气窗口的两个波段,是静止卫星通用的两个通道,可以观测较高时间分辨率、较大地域范围和不同高度的云层,加上主动式高精度设备测量得到的云参数数据的支持,在热带海洋地区云顶高度反演中已经取得较好的结果。可以设想,将分裂窗查表法应用于广泛地域空间及多个时间段上具有一定的可操作性及发展前途,因此可以进行尝试性研究。考虑到该方法确定的云顶高度偏差受纬度、卫星天顶角和季节等因素的影响,可以根据这些因素的影响程度建立多个区域、多个季节的云顶高度查算表。对于如何将基于分裂窗的二维查算表法很好地应用于中国大陆,我们做如下分析及考虑。

1) 为了解决大纬度跨度及大范围卫星观测天顶角的影响问题,同时也要考虑到中国大陆的海拔分布特点,根据红外窗的晴空云图分析地表亮温分布特点,兼顾纬度、卫星天顶角及海拔三方面,对大陆进行地域上的分块划分。

2) 在地域分块划分的基础上,根据分块地域地表亮温随季节的变化特点,在时间尺度上进行二次划分,不同分块地域季节划分尺度有所不同。

3) 在地域和季节的二维尺度上,建立多个基于分裂窗亮温及亮温差的查算表。实际应用时,根据地域和季节使用对应的查算表。

4) 有关建立查算表的方法,可以参考 1.3 节的实施步骤。

5) 对于中国大陆,在地域和季节二维尺度上进行划分时,可以采用 FY-2D/E/F 静止卫星的红外分

裂窗数据和 Cloudsat 极轨卫星的云产品数据(2B-GEOPROF)。应该注意的是,静止卫星和极轨卫星数据在空间和时间上一定要有很好的匹配。

5 展望

分析云顶高度反演方法的反演步骤,可以看出,影响云顶高度反演精度最主要的两个因素是大气廓线数据的准确性和云顶亮温的准确性。大气廓线数据不准确,会给单红外窗区法、太阳光反射率-红外窗区法和 H₂O-红外窗区法中的数据对比带来误差,也会在 CO₂ 吸收技术中进行理论值计算时产生误差。云顶亮温的准确性影响表现在卫星反演的云顶亮温不等于云顶实际温度,这样也使得对比结果产生误差。提高云顶亮温准确性的途径之一是通过其他渠道获取更多的云层信息,使得反演的云顶亮温更接近云顶实际温度;途径之二是反演的云顶亮温不与廓线数据做直接的比对(如分裂窗查算表法),但这需要可参考的高精度云顶高度值。随着不同用途的气象卫星数量及卫星探测通道的增加,联合其他波段通道数据(如可见、近红外、短波红外、中波红外及毫米波波段等)和极轨卫星数据来提高云顶高度的反演精度已经具有可行性,因此,采用多个卫星数据及多波段通道数据联合建立云顶高度反演算法成为未来的发展方向。

参考文献

- [1] 原育凯, 张永合, 尹增山. 云顶高度的天基光学遥感及反演方法综述. 红外, 2010, 31(11): 1-5
- [2] 赵仕伟, 林龙福, 赵增亮, 等. 基于 MODIS 数据与数值模式的云垂直结构估计. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2011, 12(2): 200-204
- [3] 曹亚楠, 魏合理, 徐青山. 基于 MODIS 云产品的北京地区卷云特性统计分析. 大气与环境光学学报, 2013, 8(4): 272-281
- [4] 张艳品, 章文星, 吕达仁, 等. 卫星(IASI 探测仪)观测云顶高与地基云雷达观测的对比验证. 大气科学, 2014, 38 (5): 874-884
- [5] 朱亚平, 程周杰, 刘健文, 等. 我国东南沿海 FY-2C 卫星图像上多光谱云分析技术. 热带气象学报, 2014, 30(4): 612-622
- [6] Menzel W P, Wanzong S, Nieman S, et al. Assigning heights to cloud motion vectors [EB/OL]. (2014-

- 06–13) [2015–09–15]. http://cimss.ssec.wisc.edu/iw/wg/2nd%20Wind%20Workshop/p105-116_Menzel-Assigning.pdf
- [7] Schmetz J, Holmlund K, Hoffman J, et al. Operational cloud-motion winds from meteosat infrared images. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(7): 1206–1225
- [8] Smith W L, Frey R. Altitude specification of cloud motion winds [EB/OL]. (2014–06–13) [2015–09–16]. http://cimss.ssec.wisc.edu/iw/wg/1st%20Wind%20Workshop/p189-198Smith_AltitudeSpecs.pdf
- [9] Schreiner A J, Menzel W P, Heidinger A, et al. Comparison of cloud motion vector height assignment techniques using the GOES-12 imager // *Proc Seventh Int Winds Workshop*. Helsinki: EUMETSAT, 2004: 163–170
- [10] Nieman S J, Schmetz J, Menzel W P. A comparison of several techniques to assign heights to cloud tracers. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(9): 1559–1568
- [11] Shenk W E, Curran R J. A multi-spectral method for estimating cirrus cloud top heights. *J appl meteor*, 1973, 12(7): 1213–1216
- [12] Reynolds D W, Vonder Haar T H. A bispectral method for cloud parameter determination. *Monthly Weather Review*, 1977, 105(4): 446–457
- [13] Szejwach G. Determination of semi-transparent cirrus cloud temperature from infrared radiances: application to meteosat. *Journal of Applied Meteorology*, 1982, 21(3): 384–393
- [14] Inoue T. On the temperature and effective emissivity determination of semi-transparent cirrus clouds by bispectral measurements in the 10 μm window region. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1985, 63(1): 88–99
- [15] Inoue T. A cloud type classification with NOAA 7 split-window measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(D4): 3991–4000
- [16] Derrien M L, LeGléau L H. Retrieval of the cloud top temperature of semi-transparent clouds with AVHRR // *Proceedings of the IRS'88*. Lille, 1988: 199–202
- [17] Hamada A, Nishi N, Iwasaki S, et al. Cloud type and top height estimation for tropical upper-tropospheric clouds using GMS-5 split-window measurements combined with cloud radar measurements. *Scientific Online Letters on the Atmosphere Sola*, 2008, 4(1): 57–60
- [18] Hamada A, Nishi N. Development of a cloud-top height estimation method by geostationary satellite split-window measurements trained with cloudsat data. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2010, 49(9): 2035–2049
- [19] 刘诚, Bagtasa G, Kuze H, 等. 基于 NOAA16-AVHRR 数据反演中纬度陆地上空云类型及云顶高度信息. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(4): 301–305
- [20] Smith W L. An improved method for calculating tropospheric temperature and moisture from satellite radiometer measurements. *Monthly Weather Review*, 1968, 96(6): 387–396
- [21] Smith W L, Platt C M R. Comparison of satellite-deduced cloud heights with indications from radiosonde and ground-based laser measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 2010, 17(12): 1796–1802
- [22] Smith W L, Frey R. On cloud altitude determinations from high resolution interferometer sounder (HIS) observations. *Journal of Applied Meteorology*, 1990, 29(7): 658–662
- [23] Menzel W P, Smith W L, Stewart T R. Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS. *Journal of Applied Meteorology*, 1983, 22: 377–384
- [24] Menzel W P, Frey R A, Zhang H, et al. MODIS global cloud-top pressure and amount estimation: algorithm description and results. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2008, 47(4): 1175–1198
- [25] Menzel W P, Schmit T J, Wylie D P. Cloud characteristics over central Amazonia during GTE/ABLE 2B derived from multispectral visible and infrared spin scan radiometer atmospheric sounder observations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1990, 95(D10): 17039–17042
- [26] Baum B A, Wielicki B A. Cirrus cloud retrieval using

- infrared sounding data: multilevel cloud errors. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33: 107–117
- [27] Wylie D P, Wang P H. Comparison of SAGE-II and HIRS co-located cloud height measurements. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26: 3373–3376
- [28] Frey R A, Baum B A, Menzel W P, et al. A comparison of cloud top heights computed from airborne lidar and MAS radiance data using CO₂ slicing. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1999, 1042(D20): 24547–24556
- [29] Ellrod G P, Schreiner A J. Volcanic ash detection and cloud top height estimates from the GOES-12 imager: coping without a 12 μ m infrared band. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(15): 1–4
- [30] Naud C, Muller J P, Haeffelin M, et al. Assessment of MISR and MODIS cloud top heights through inter-comparison with a back-scattering lidar at SIRTa. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(4): 235–250
- [31] Holz R E, Ackerman S, Antonelli P, et al. An improvement to the high-spectral-resolution CO₂-slicing cloud-top altitude retrieval. *J Atmos Oceanic Technol*, 2006, 23(5): 653–670
- [32] Chang F L, Minnis P, Lin B, et al. A modified method for inferring upper troposphere cloud top height using the GOES 12 imager 10.7 and 13.3 μ m data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115 (D6): 620–631
- [33] Chang F L, Minnis P, Ayers J K, et al. Evaluation of satellite-based upper troposphere cloud top height retrievals in multilayer cloud conditions during TC4. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(D10): 11–15
- [34] 董超华, 刘玉洁, 张凤英, 等. 利用美国 NOAA 卫星遥测云顶高度的数值试验. *气象*, 1987, 13(10): 24–28
- [35] 林琳, 黄思训, 杜华栋. MODIS 数据的云顶高度反演. *地球信息科学*, 2006, 8(2): 106–109
- [36] 朱亚平, 程周杰, 刘健文, 等. FY-2C 静止气象卫星资料对不透明云云顶气压的反演研究. *热带气象学报*, 2014, 30(3): 463–472
- [37] Chahine M T. Remote sounding of cloudy atmospheres. I. The single cloud layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1974, 31(1): 233–243
- [38] Wielicki B A, Coakley J A. Cloud retrieval using infrared sounder data: error analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 1981, 20: 157–169
- [39] 官莉, 肖稳安, Huang H-L. 红外高光谱观测值反演云参数. *大气科学*, 2007, 31(6): 1123–1127
- [40] Liou K N. 大气辐射学导论. 郭彩丽, 周诗健, 译. 2 版. 北京: 气象出版社, 2004: 423–415
- [41] 李亚君. 风云二号(FY-2)气象卫星业务产品[EB/OL]. (2014–06–19) [2015–09–22]. <http://www.nsmc.cma.gov.cn/NewSite/NSMC/Contents/101431.html>