

文章编号: 1672-8785(2022)08-0033-11

基于卫星红外窗区数据的云顶高度反演方法

段 炼 张 杨

(中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618300)

摘 要: 云顶高度是云最基本且十分重要的参数, 同时也是研究空域容量、航线高度配备和天气预测预警等的重要参数。简单描述了基于卫星资料反演云顶高度的主要方法的原理和优缺点, 然后介绍了单红外窗区法、太阳光反射率-红外窗区法、 H_2O -红外窗区法和红外分裂窗查算表算法的原理和优缺点, 并对相关卫星的业务算法进行了简要评述。接着对单红外窗区法反演对流云云顶高度进行了检验。结果表明, 单红外窗区法反演不透明厚云的精度和相关性都很高。最后分析了影响各方法精度的原因, 并对后续云顶高度反演方法进行了展望。

关键词: 卫星资料; 云顶高度; 红外窗区法

中图分类号: P405 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.08.006

Retrieving Method of Cloud Top Height Based on Satellite Infrared Window Data

DUAN Lian, ZHANG Yang

(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618300, China)

Abstract: Cloud top height is the most basic and important parameter of cloud, and it is also an important parameter for studying airspace capacity, flight altitude configuration, weather forecast and early warning. The principles, advantages and disadvantages of the main methods for retrieving cloud top heights based on satellite data are described briefly in this paper. The single infrared window method, the solar reflectance-infrared window method, the H_2O -infrared window method and the infrared split window zone method are introduced as the main point. And the related business algorithm of satellite is briefly reviewed. Then, the inversion of convective cloud top height by single infrared window method is verified. The results show that the inversion of opaque thick cloud by single infrared window method has high accuracy and correlation. Finally, the reasons affecting the accuracy of each method are analyzed and the future of cloud top height inversion methods is prospected.

Key words: satellite data; cloud top height; infrared window method

收稿日期: 2022-04-04

基金项目: 民航飞行技术与飞行安全重点实验室自主研究项目(FZ2020ZZ03); 中国民航飞行学院科研项目(09005001)

作者简介: 段炼(1968-), 男, 四川蓬安人, 副教授, 主要研究方向为航空气象。

E-mail: cafcldl@163.com

0 引言

云顶高度是指云在大气中的上边界高度,是云的主要参数。云顶的相关参数还有温度和充满度等,对其进行测量是现代气象预报的重要技术手段。作为对流天气预警预报、研究多云气候影响的重要因子,云顶高度对于数值天气预报、大气研究和天气模拟研究都非常关键,同时对于民航运营和雷暴警报工作也意义重大^[1-3]。因此,如何准确获取云顶高度是一个重要研究点。

气象卫星依托其携带的观测仪器可从高空对地球进行气象观测,具有观测范围更广、观测时间更长、观测精度更高的特点。作为反演云顶高度的主要资料,气象卫星可通过可见光、近红外和红外波段对云进行检测,提供红外云图、可见光云图和水汽图等^[4-5]。目前使用较多的卫星资料包括 Himawari-8 卫星、FY 系列卫星、NOAA 系列、GOES 系列等。本文对卫星资料反演云顶高度的原理和优缺点进行简单描述,并着重介绍红外窗区法的原理和优缺点。

1 云顶高度反演方法概述

卫星反演云顶高度的方法分为几何法和物理法两大类。其中,几何法包括单星观测法、单星多角度观测法、双星联合观测法;物理法包括单/多通道反演亮温法、分裂窗方法、二氧化碳分层法(辐射比法)^[6]。

单星观测法^[9-10,13,23-30]基于同一气象卫星连续对固定目标进行两次观测(类似于立体观测),进而推算云顶高度。单星多角度观测法^[10,31-35]基于极轨气象卫星的各观测仪器在同

一时间对固定目标进行多角度观测(类似于立体观测),从而对云顶高度进行推算。双星联合观测法^[10-12,33-42]基于两颗气象卫星在同一时间从不同角度对目标进行观测(类似于立体观测),进而推算云顶高度。

单/多通道反演亮温法^[5-6,10-13]基于大气红外窗口辐射资料推算云顶高度。该方法将云视为黑体(即云的发射率为 1),通过对通道所测等效黑体温度与相邻时刻的大气温度廓线进行比对来获取云顶高度。分裂窗方法^[5-6,13-18]将卫星某通道一分为二,通过把云辐射率和双通道辐射率代入公式来求解出云顶温度,进而推算云顶高度。二氧化碳分层法(辐射比法)^[4-7,17-21]基于二氧化碳吸收通道计算云和邻近晴空辐射率差值,通过根据差值的比率构造传输方程来推算云顶高度。

几何法精度高但时间和空间覆盖范围小;物理法精度低但可连续观测且覆盖范围广。表 1 列出了上述方法的优缺点。

2 以红外窗区法为主的算法介绍

本文着重介绍红外窗区法的原理和优缺点,包括单红外窗区法、太阳光反射率-红外窗区法、H₂O-红外窗区法和红外分裂窗查算表算法^[4-5,43]。

2.1 单红外窗区法

单红外窗区法^[5-7,44-50]采用 3~5 μm 和 8~14 μm 任意通道的实测数据进行云顶高度反演。该算法将云视作黑体(即云的发射率为 1),通过将实测辐射代入普朗克公式来求解云顶温度,进而推算出云顶高度^[49]。

单红外窗区法的反演步骤分为两步:第一

表 1 几何法和物理法的优缺点

方法	优点	缺点
单/多通道反演亮温法	简便、直接	误差大
分裂窗区法	不依赖于云发射率	用于较高云层
二氧化碳分层法	忽略大气压力梯度差	不适用于多层云和差值较小
单星观测法	易于操作	同步性差且误差大
单星多角度观测法	准同步观测	观测区域小
双星联合观测法	观测范围广	同时性差且受云变化影响

步, 将实测辐射代入普朗克公式计算, 反演得云顶温度, 即 $I_{\lambda} = B_{\lambda}(T_c)$ 。其中, I_{λ} 为实测辐射, $B_{\lambda}(T_c)$ 为对应于温度 T_c 的黑体辐射值。第二步, 将反演的云顶温度与大气温度廓线(实测探空数据或 ERA5 及其他再分析数据)进行比较, 并通过插值获取云顶高度。常用通道是 $11 \mu\text{m}$ 通道。以 Himawari-8 卫星为例, $11 \mu\text{m}$ 通道包括 IR7($10.4 \mu\text{m}$)和 IR8($11.2 \mu\text{m}$)。NO-AA 系列、FY 系列、GOES 系列等卫星上均有 $11 \mu\text{m}$ 通道。

单红外窗区法是最直接、简单的云顶高度反演方法。但将云视作黑体, 所得云顶温度实则为黑体温度。相对于薄云、半透明云, 该方法更适用于具有一定厚度的不透明云。

2.2 太阳光反射率-红外窗区法

太阳光反射率-红外窗区法^[4,15-17,51-54]采用 $0.2 \sim 4 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 任意通道的实测数据进行云顶高度的反演。单红外窗区法不适合检索其他云的主要原因是无法有效估计云发射率。Shenk W E 等人^[27]为弥补单红外窗区法的不足, 提出了太阳光反射率-红外窗区法。他们利用云对太阳光的反射预估云的覆盖率, 通过预估覆盖率和通道实测值来计算红外辐射, 最后结合大气廓线数据进行云顶高度的反演。

卫星接收的辐射亮度 I 包含云自身辐射亮度、云下辐射亮度、云上辐射亮度和无云区的晴空辐射亮度:

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

式中, $I_{\text{cld}} = B_{\text{cld}} t(p_c, 0) + I_{\text{path}}(p_c, 0)$, 代表实测黑体云顶和云上的辐射值; I_{clr} 为晴空辐射值, $I_{\text{clr}} = I'_{\text{dr}}(p_c, 0) + I_{\text{path}}(p_c, 0)$; B_{cld} 为同一温度下的黑体辐射值; I'_{dr} 代表相同温度下的云下辐射值; I_{path} 代表相同温度下的云上辐射值; $t(p_c, 0)$ 代表云顶到大气层顶的透射率; N 代表云覆盖率; ϵ 代表云发射率, ϵ' 代表有效发射率, 因此 $\epsilon' = N\epsilon$ 。

太阳光反射率-红外窗区法取决于云在红外及可见光波段的反射率, 所以只能在白天反演云顶高度。但相较于单红外窗区法, 其适用范围更广, 反演精度也更高。

2.3 H₂O-红外窗区法

H₂O-红外窗区法^[4,24,46-47,55-63]采用 $5.7 \sim 7.1 \mu\text{m}$ 任意水汽通道以及 $10.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 任意红外通道的辐射资料进行卷云云顶高度的反演。运用太阳光反射率-红外窗区法中的式(1)分别计算水汽通道和红外通道:

$$I_{6.7}(T_{6.7}) = I_{6.7}(T_F) + \epsilon'_{6.7} [I_{6.7}(T_{\text{cld}}) - I_{6.7}(T_F)] \quad (2)$$

$$I_{11}(T_{11}) = I_{11}(T_G) + \epsilon'_{11} [I_{11}(T_{\text{cld}}) - I_{11}(T_G)] \quad (3)$$

式中, 下标为所选通道, 6.7 代表水汽通道, 11 代表红外通道; $T_{6.7}$ 和 T_{11} 分别为上述两个通道的亮温值; T_F 和 T_G 分别为两个通道的晴空亮温值; T_{cld} 为云顶温度; $I_{6.7}(T_{6.7})$ 和 $I_{11}(T_{11})$ 分别为两个通道的实测辐射值; $I_{6.7}(T_F)$ 和 $I_{11}(T_G)$ 分别为两个通道的晴空辐射值; $I_{6.7}(T_{\text{cld}})$ 和 $I_{11}(T_{\text{cld}})$ 分别为两个通道的黑体辐射值; $\epsilon'_{6.7}$ 和 ϵ'_{11} 分别为两个通道的有效发射率。

若通道有效发射率相等, 即 $\epsilon'_{6.7} \approx \epsilon'_{11}$, 则可消除式(2)和式(3)中的 $\epsilon'_{6.7}$ 和 ϵ'_{11} , 得

$$I_{6.7}(T_{6.7}) = a \cdot I_{11}(T_{11}) + b \quad (4)$$

$$a = [I_{6.7}(T_{\text{cld}}) - I_{6.7}(T_F)] / [I_{11}(T_{\text{cld}}) - I_{11}(T_G)] \quad (5)$$

$$b = [I_{6.7}(T_F) I_{11}(T_{\text{cld}}) - I_{6.7}(T_{\text{cld}}) I_{11}(T_G)] / [I_{11}(T_{\text{cld}}) - I_{11}(T_G)] \quad (6)$$

L_1 为根据式(4)求得的曲线。通过卷云在不同地区的双通道实测辐射值, 计算出 a 、 b 值, 从而得到 L_1 。

当云为黑体(即云的有效发射率均为 1)时, $T_{6.7} = T_{11} = T_{\text{cld}}$, 相应通道的辐射值可用 $I_{6.7}(T_{\text{cld}})$ 和 $I_{11}(T_{\text{cld}})$ 表示, 两者的关系为

$$I_{6.7}(T_{\text{cld}}) = f I_{11}(T_{\text{cld}}) \quad (7)$$

式中, f 代表两通道的辐射比。 L_2 为根据式(7)求得的曲线。计算 T_{cld} 对应的 $I_{6.7}(T_{\text{cld}})$ 和 $I_{11}(T_{\text{cld}})$, 从而确定 L_2 曲线。

L_1 和 L_2 交点处的亮温为真实云顶温度。将其与大气温度廓线(当地探空数据或 ERA5 及其他再分析资料)比较,得到云顶高度。

H_2O -红外窗区法的反演精度高于单红外窗区法,低于太阳光反射率-红外窗区法,但它没有时间约束。由于采用的是水汽通道,该方法不适用于低云云顶高度的反演。反演时需要多个云像元填补视野,所以不建议将其用于反演小尺度云。

2.4 红外分裂窗查算表算法

红外分裂窗查算表算法^[4,8,64-71]采用星载雷达等自动式设备的实测云参数和 $11\ \mu\text{m}$ 、 $12\ \mu\text{m}$ 通道数据来共同构建查算表。将红外数据和星载雷达等自动式设备数据在时间和空间上进行匹配。其中,红外通道提供 $11\ \mu\text{m}$ 通道亮温和双通道亮温差(Brightness Temperature Difference, BTD)。后者常取 $11\ \mu\text{m}$ 与 $12\ \mu\text{m}$ 通道亮温的差值。自动式设备提供云层垂直结构资料,用于获取云顶高度数据。最后对三者数据进行匹配填充处理,建立查算表。

运用红外分裂窗的物理基础如下:(1)在所选通道中,将厚云看作发射率为 1 的黑体;(2)对于卷云, $11\ \mu\text{m}$ 通道亮温和 BTD 有明显区别;(3)红外通道存在少量水汽吸收, $12\ \mu\text{m}$ 通道的吸收大于 $11\ \mu\text{m}$ 通道。

通道的发射率关系为

$$\epsilon'_{12} = 1 - (1 - \epsilon'_{11})^{1.08} \quad (8)$$

式中, ϵ'_{11} 代表 $11\ \mu\text{m}$ 通道的有效发射率; ϵ'_{12} 代表 $12\ \mu\text{m}$ 通道的有效发射率。基于式(1),通过 BTD 可得

$$\begin{aligned} \Delta I_{11-12} = & (I_{dr,11} - I_{dr,12}) + (\epsilon'_{11} I_{dd,11} - \epsilon'_{12} I_{dd,12}) \\ & - (\epsilon'_{11} I_{dr,11} - \epsilon'_{12} I_{dr,12}) = \Delta I_{dr} + \epsilon'_{11} \\ & \times (\Delta I_{dd} - \Delta I_{dr}) + \Delta \epsilon' (I_{dd,11} - I_{dr,12}) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $I_{dr,11}$ 代表 $11\ \mu\text{m}$ 通道的晴空辐射值, $I_{dr,12}$ 代表 $12\ \mu\text{m}$ 通道的晴空辐射值, $I_{dd,11}$ 代表 $11\ \mu\text{m}$ 通道的黑体辐射值, $I_{dd,12}$ 代表 $12\ \mu\text{m}$ 通道的黑体辐射值; $\Delta I_{dr} = I_{dr,11} - I_{dr,12}$,代表晴空辐射差; $\Delta I_{dd} = I_{dd,11} - I_{dd,12}$,代表黑体辐射差; $\Delta \epsilon' = \epsilon'_{11} - \epsilon'_{12}$,代表有效发射率差。经分

析可知,具有一定厚度的云即可看作黑体,其相关通道辐射近似相等,存在 $\Delta I_{11-12} = 0$ 。在晴空中, $\epsilon'_{11} = \epsilon'_{12} = 0$, $\Delta I_{11-12} = \Delta I_{dr}$,红外通道存在少量的水汽吸收,且 $12\ \mu\text{m}$ 通道大一些。所以 ΔI_{dr} 与水汽量有关,BTD 值大于 0。

与太阳光反射率-红外窗区法相比,它适用于任意时段的云顶高度反演。与 H_2O -红外窗区法相比,它适用于任意高度层的云顶高度反演,但精度受设备、卫星和季节影响。为了提高反演精度,可为上述要素分别建立查算表。

3 单红外窗区法反演检验

利用阈值法对 Himawari-8 卫星的 $11\ \mu\text{m}$ 通道亮温进行筛选,确定对流云区域。本文所选阈值为 -32°C ,大致为对流降水云的边界,能更好地进行反演。如图 1 所示,选取筛选区域的最大亮温值 T_0 。在 ERA5 资料中, T_0 位于不同层次温度(T_1, T_2)区间内, (T_1, T_2) 对应的高度层为 (P_1, P_2)。可通过线性插值得到 T_0 对应的气压 P_0 ,最后由气压算得云顶高度 H 。

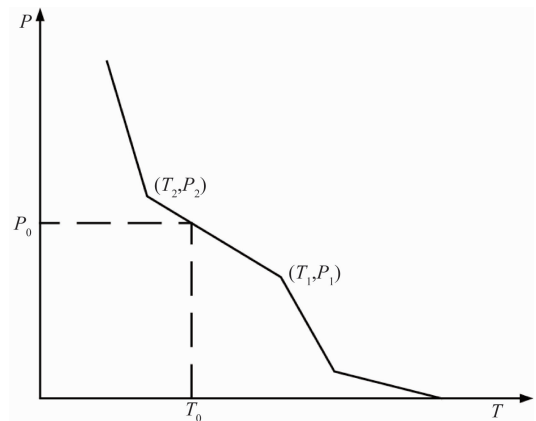


图 1 云顶高度的计算

本文选用单红外窗区法对 2019 年 6~8 月对流云云顶高度进行反演检验,并将反演结果与 GPM 产品的实测云顶高度进行对比检验。图 2(a)中的横坐标为纬度,纵坐标为云顶高度(单位为 km);图 2(b)中的横坐标为经度,纵坐标为云顶高度(单位为 km)。带正方形的实线为 GPM 产品的实测云顶高度,带三角形的虚线为反演结果 H 。在所选区域($20^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{N}$,

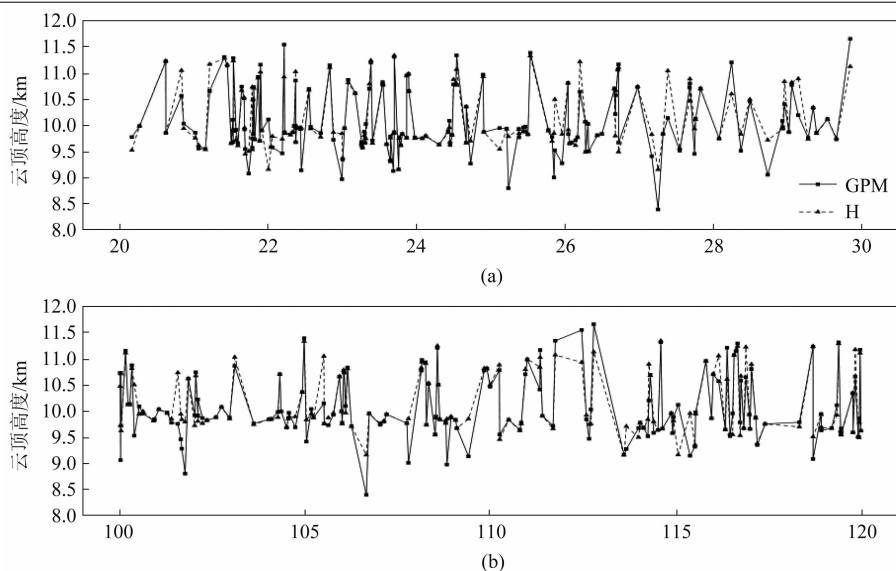


图 2 6~8 月 GPM 和单红外窗区法反演云顶高度的折线图: (a) 纬向; (b) 经向

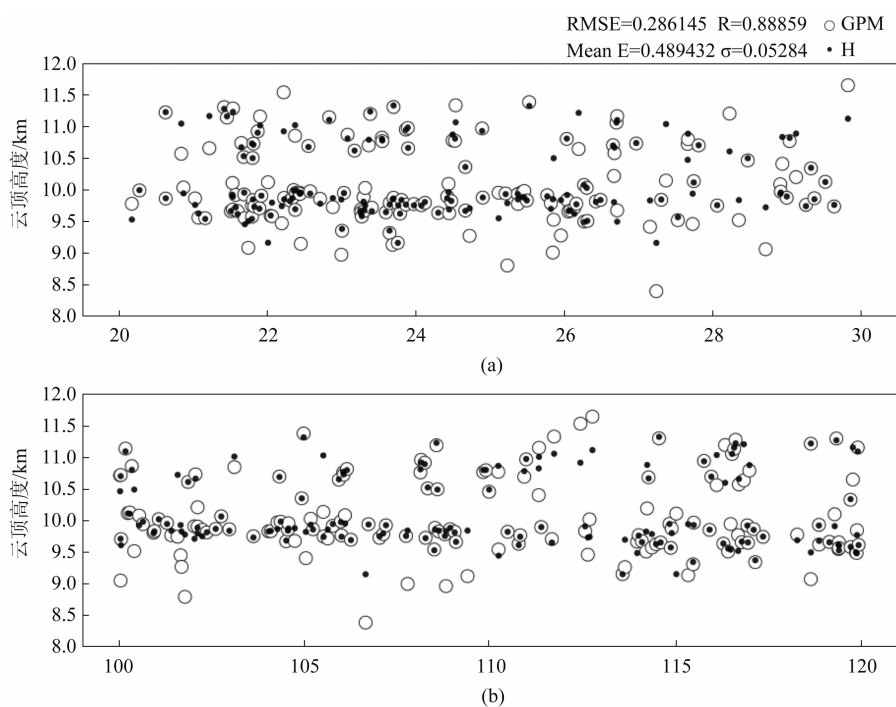


图 3 6~8 月 GPM 和 H 的散点图: (a) 纬向; (b) 经向

100°E~120°E) 中, 分别从经向和纬向进行对比。结果显示, 对流云反演结果 H 与 GPM 最大差值为 0.98689 km, 最小差值为 0.00182 km, 且均差较小, 反演精度较高。图 3 中, 空心圆圈为 GPM 实测数据, 实心圆圈为反演结果 H 。二者的均方根差约为 0.29, 相关系数约为 0.9, 相关性较高。

综上所述, 单红外窗区法反演对流云云顶

高度的精度较高, 相关性较好, 在反演不透明的厚云时具有较高的准确性。

4 主要气象卫星的业务算法

4.1 GOES-R 卫星

GOES-R 卫星目前是 NOAA 最先进的静止气象卫星, 于 2016 年成功发射, 载有最先进的高级基线成像仪 (ABI)。GOES-R 卫星的云顶高度相关产品正是基于 ABI 计算得出的。

ABI 包含 16 个波段。其中, 可见光波段的精度为 0.5~1 km, 红外波段的精度为 1~2 km。

GOES-R ABI 云顶高度算法(ACHA)主要使用 11 μm 、12 μm 和 13 μm 通道, 能够提供白天、夜晚和明暗条件下的相关产品。ACHA 将红外辐射传输分析模型嵌入最优估计算法, 从而反演出更加精确的云顶温度。通过将反演的云顶温度线插入由数值天气预报(NWP)提供的云顶温度和大气廓线, 可以得到云顶压力和云顶高度。目前的 ACHA 主要借鉴 NESDIS 的 CLAVR-x 分裂窗云高度算法和 UN/CIMSS 开发的 MODIS CO₂ 云高度算法, 但它仍存在延迟的问题。图 4 为 ACHA 处理概述图。

4.2 Himawari-8 卫星

Himawari-8 卫星目前是日本最先进的静止气象卫星, 于 2016 年成功发射, 载有扫描辐射成像仪(AHI)。Himawari-8 卫星的云顶高度相关产品正是基于 AHI 计算得出的。AHI 包含 16 个波段。其中, 可见光波段的精度为 0.5~1 km, 红外波段的精度为 1~2 km。

Himawari-8 的 AHI 云顶高度算法主要采用 6.2 μm 、7.3 μm 、11.2 μm 、13.3 μm 波段, 并使用插值法、辐射比法和截距法。根据日本气象厅的云类型产品(CT)提供的云类型进行算法选择。对于半透明云, 采取截距法(若结果不适用, 则采取辐射比法); 对于不透明云和碎云, 采取插值法。Himawari-8 算法反演出更加精准的云顶压力, 并将该数据插入由数值天气预报(NWP)提供的云顶压力和大气廓线, 从而得到云顶温度和云顶高度。目前, 该算法是基于 EUMETSAT 的 NoWCasting 卫星应用设施(NWCASF)的。但与 MODIS 和 Calipso 相比, 其云顶高度被低估。图 5 为 AHI 云顶高度算法处理概述图。

4.3 FY-4 卫星

FY-4 卫星是目前中国最先进的静止气象卫星, 于 2014 年成功发射, 载有辐射成像仪(AGRI)。FY-4 卫星的云顶高度相关产品正是基于 AGRI 计算得出的。AGRI 包含 14 个波

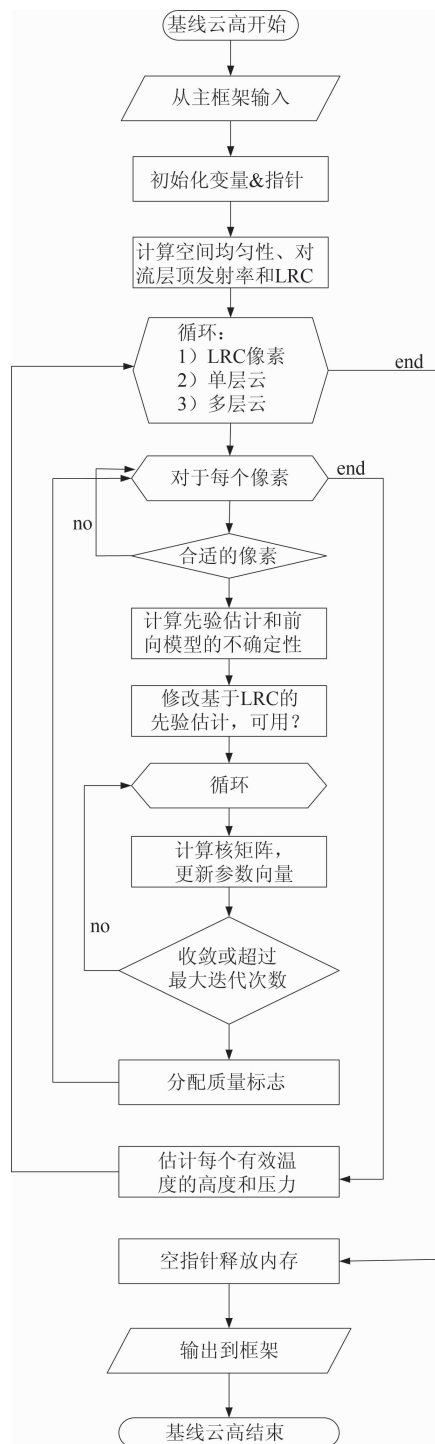


图 4 ACHA 处理概述图

段。其中, 可见光波段的精度为 0.5~1 km, 中短波红外波段的精度为 2 km, 长波红外波段的精度为 4 km。

FY-4 AGRI 云顶高度算法(FCTHA)主要使用 10.8 μm 、12 μm 、13.5 μm 波段, 并将 CO₂ 吸收通道提供的云顶高度的敏感性与红外

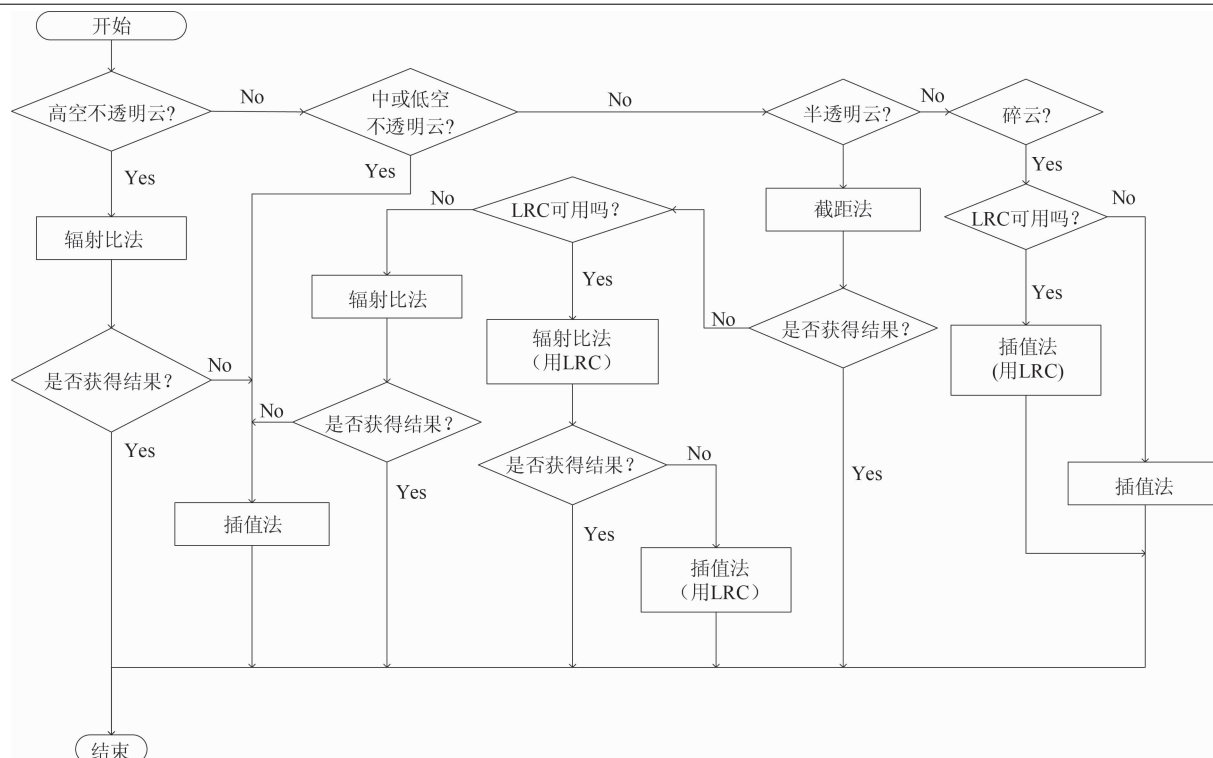


图 5 AH1 云顶高度算法处理概述图

通道提供的云微物理敏感性优点相融合。FCTHA 将红外分裂窗和 CO_2 切片算法相结合, 反演出更加精准的云顶温度, 最后根据云顶温度和数值天气预报(NWP)提供的大气温度廓线得到云顶高度和云顶气压。图 6 为 FCTHA 算法处理概述图。

5 结束语

通过分析上述反演方法原理可知, 大气廓线资料和云顶温度是影响反演精度的主要因素。大气廓线资料精度不高会导致单红外窗区法、太阳光反射率-红外窗区法和 H_2O -红外窗区法的反演偏差过大。如果卫星资料的云顶温度与实际云顶温度不相等, 同样会导致偏差。因此, 提高反演精度的方法一是提高云顶温度测量的精确度, 可通过缩小反演云顶温度和实际温度的差值来实现; 方法二是反演云顶温度不同大气廓线资料进行比较, 而参考精度更高的资料。目前, 随着各种气象卫星的投入使用, 提高反演精度的可行性大大提升。因此, 联合多卫星资料和多波段资料的反演方法成为大势所趋。

参考文献

- [1] 李星, 姜坤, 董绪荣. 一种北斗联合低轨星座的导航增强方法研究 [J]. 无线电通信技术, 2020, **46**(2): 234-238.
- [2] 李兴武, 董海萍, 郭卫东, 等. ATOVS 不同卫星资料在台风模拟中的同化实验研究 [J]. 热带气象学报, 2012, **28**(2): 157-166.
- [3] Li X, Ma F, Li X, et al. LEO constellation augmented multi-GNSS for rapid PPP convergence [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, **93**(5): 749-764.
- [4] 樊宏杰, 黄亦鹏, 李万彪. 基于卫星红外遥感的云顶高度反演算法综述 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, **53**(11): 783-792.
- [5] 陈建楠, 白洁, 周著华, 等. 卫星资料遥感云顶高度反演方法综述 [J]. 气象水文海洋仪器, 2017, **3**(1): 116-120.
- [6] 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 [J]. 红外, 2010, **31**(11): 1-5.
- [7] 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 [J].

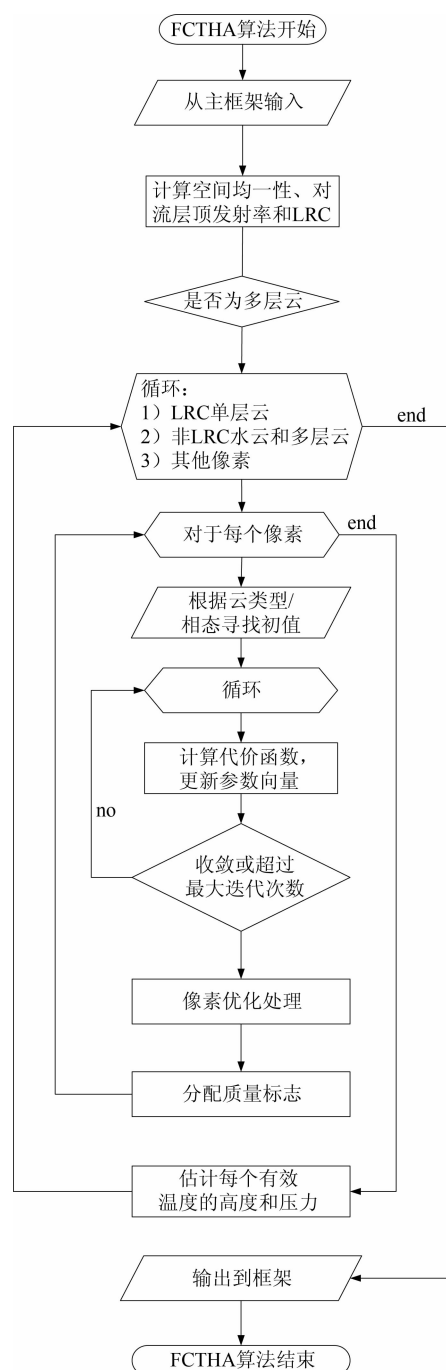


图 6 FCTHA 算法处理概述图

热带气象学报, 2014, **30**(3): 463–472.

- [8] 李冠林, 严卫, 王蕊, 等. 基于 A-Train 综合资料的云顶高度反演研究 [J]. 气象, 2016, **42**(8): 971–979.
- [9] 李艳兵, 黄思训, 翟景秋. 云的立体观测研究进展 [J]. 热带气象学报, 2008, **24**(6): 743–747.
- [10] 黄云仙, 马硕, 白衡. 立体观测法探测云顶高度的误差分析 [J]. 红外与毫米波学报, 2012, **31**

(4): 315–318.

- [11] 黄磊, 吕胜辉, 张焱, 等. 双星立体观测云顶高度几何反演方法 [J]. 北京大学学报, 2008, **44**(1): 129–134.
- [12] 王洪庆, 吕胜辉, 张焱, 等. 双星立体观测的云顶高度反演 [C]. 北京: 中国气象学会年会, 2003.
- [13] 陈建楠, 白洁, 周著华, 等. 卫星资料遥感云顶高度反演方法综述 [J]. 气象水文海洋仪器, 2017, **3**(1): 116–120.
- [14] Hasler A F. Stereographic observations from satellites: an important new tool for the atmospheric science [J]. *Bulletin American Meteorological Society*, 1981, **62**(2): 194–212.
- [15] Bridge G C. Meteosat system guide (Volume 5): Meteorological Products [R]. Darmstadt: Meteosat Data Management Department, 1980.
- [16] Wielicki B A, Fusco L, Morgan J, et al. Operational production of cloud motion vectors (satellite winds) from Meteosat image data: use of data from meteorological satellites [J]. *European Space Agency*, 1979, **143**: 65–75.
- [17] Szejwach G. Determination of semi-transparent cirrus cloud temperature from infrared radiances: application to METEOSAT [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1982, **21**(3): 384–393.
- [18] Eyer J R, Menzel W P. Retrieval of cloud parameters from satellite sounder data: a simulation study [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1989, **28**(4): 267–275.
- [19] Platnick S, King M D, Ackerman S A, et al. The MODIS cloud products: algorithms and examples from Terra [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, **41**: 459–473.
- [20] Menzel W P, Smith W L, Stewart T R. Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1983, **22**(3): 377–384.
- [21] Robert E H, Steve A, Paolo A, et al. An improvement to the high-spectral-resolution CO₂-slicing cloud top altitude retrieval [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2006, **23**(5): 653–670.

- [22] Aumann H H, Desouza-Machado S G, Behrangi A. Deep convective clouds at the tropopause [J]. *Atmos Chem Phys*, 2011, **11**(3): 1167–1176.
- [23] Hawkinson J A, Flett W, Ackerman S A. A comparison of GOES sounder and cloud lidar and radar-retrieved cloud-top heights [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, **44**(8): 1234–1242.
- [24] Onderjka R J, Conner J H. Note on the stereo interpretation of NIMBUS II APT photography [J]. *Monthly Weather Review*, 1996, **94**(10): 611–614.
- [25] Madine S, Key M P, Mahoney J L. Comparing the FAA cloud top height product and THENES-DIS/CIMSS cloud top pressure product in oceanic regions [C]. Monona: 11th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, 2001.
- [26] Kikuchi K, Kasai T. Stereoscopic analysis of photographs taken by NIMBUS II APT system [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1968, **46**: 60–67.
- [27] Shenk W E, Holub R. An example of detailer cloud contouring from Apollo-6 photography [J]. *Bulletin American Meteorological Society*, 1971, **52**(4): 238.
- [28] Whitehead V S, Browne I D, Garcia J G. Cloud height contouring from Apollo-6 photography [J]. *Bulletin American Meteorological Society*, 1969, **50**(1): 4–15.
- [29] Shenk W E, Neff R A. Stereographic cloud analysis from Apollo-6 photographs over a cold front [J]. *Bulletin American Meteorological Society*, 1975, **56**(1): 4–15.
- [30] Black P G. Some aspects of tropical storm structure revealed by hand held camera photographs from space [M]. Washington D C: United States Government Printing Office, 1977.
- [31] 马烁, 黄云仙, 严卫, 等. 三线阵云立体探测技术 [J]. *红外与毫米波学报*, 2014, **33**(2): 164–171.
- [32] 胡崇金. 用遥感资料求云层高度及地形起伏 [J]. *遥感信息*, 1988, **3**(3): 7–10.
- [33] Seiz G, Poli D, Gruen A. Stereo cloud-top height from MISR and AATER for validation of Eumetsat cloud-top height products [C]. Prague: Eumetsat Users' Conference, 2012.
- [34] Moronet C, Davies R, Muller J P. Operational retrieval of cloud-top height using MISR data [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 2002, **40**(7): 1532–1540.
- [35] 孔祥海, 陈跃庭, 李奇, 等. 一种用于敏捷卫星自主任务规划的云顶高探测方法 [J]. *光学学报*, 2015, **35**(7): 372–380.
- [36] Wang H Q, Lu S H, Zhang Y, et al. Determination of Cloud-Top Height from Stereoscopic Observation [J]. *Progress in Natural Science*, 2002, **12**(9): 689–694.
- [37] 黄磊. 基于图像匹配和模式识别技术的卫星资料应用 [D]. 北京: 北京大学, 2007.
- [38] 陆风. 基于几何分析的静止卫星云顶高度定量反演研究 [D]. 北京: 北京大学, 2008.
- [39] 吕胜辉. 双星立体观测的云顶高度反演 [D]. 北京: 北京大学, 2002.
- [40] 赵文化, 单海滨. 风云静止卫星双星立体观测云顶高度反演初步研究 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2018, **38**(2): 200–205.
- [41] 卢晔琳. 静止卫星立体观测云顶高度几何算法研究 [J]. *科学技术与工程*, 2014, **14**(4): 1–6.
- [42] 王富, 赵宇. 风云四号静止气象卫星的云顶高度反演算法 [J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 2021, **44**(3): 412–418.
- [43] Menzel W P, Wanzong S, Nieman S, et al. Assigning heights cloud motion vectors [EB/OL]. http://cimss.ssec.wisc.edu/iwgg/2nd%20Wind%20Workshop/p105-116_Menzel-Assigning.pdf, 2015.
- [44] Schmetz J, Holmlund K, Hoffman J, et al. Operational cloud-motion winds from meteosat infrared images [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, **32**(7): 1206–1225.
- [45] Smith W L, Frey R. Altitude specification of cloud motion winds [EB/OL]. http://cimss.ssec.wisc.edu/iwgg/1st%20Wind%20Workshop/p189-198Smith_Altitude Specs.pdf, 2015.
- [46] Schreiner A J, Menzel W P, Heidinger A, et al. Comparison of cloud motion vector height assignment techniques using the GOES-12 ima-

- ger [C]. Helsinki: Proc Seventh International Winds Workshop, 2004.
- [47] Nieman S J, Schmetz J, Menzel W P. A comparison of several techniques to assign heights to cloud tracers [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, **32**(9): 1559–1568.
- [48] Wielicki B A, Parker L. On the determination of cloud cover from satellite sensors: the effects of sensor spatial resolutions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**: 12799–12823.
- [49] 李五生, 王洪庆, 吴琼, 等. 静止卫星云图的云位置偏差及其几何校正 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, **48**(5): 732–736.
- [50] Hollars S, Fu Q, Comstock J, et al. Comparison of cloud-Top height retrievals from ground-based 35 GHz MMCR and GMS-5 satellite observation at ARM TWP Manus site [J]. *Atmosphere Research*, 2004, **72**(1): 169–186.
- [51] Shenk W E, Curran R J. A multi-spectral method for estimating cirrus cloud top heights [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1973, **12**(7): 1213–1216.
- [52] 张春桂, 林炳青. 基于 FY-2 卫星数据的福建沿海海雾遥感观测 [J]. *国土资源遥感*, 2018, **30**(1): 7–13.
- [53] Berendes T A, Mecikalski J R, Mackenzie W M J, et al. Convective cloud identification and classification in daytime satellite imagery using standard deviation limited adaptive clustering [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**(7): D010287.
- [54] Szejwach G. Determination of semi-transparent cirrus cloud temperature from infrared radiances: application to meteosat [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1982, **21**(3): 384–393.
- [55] 朱亚平, 程周杰, 刘健文. 一次锋面气旋云系中强对流云团的识别 [J]. *应用气象学报*, 2009, **20**(4): 428–436.
- [56] 方翔, 邱红, 曹志强, 等. 应用 AMSU-B 微波资料识别强对流云区的研究 [J]. *气象*, 2008, **34**(3): 22–29.
- [57] Schmetz J, Pili P, Tjemkes S, et al. An introduction to meteosat second generation (MSG) [J]. *Bull Amer Meteor*, 2002, **83**(7): 977–992.
- [58] Bedka K, Brunner J, Dworak R, et al. Objective satellite-based Detection of overshooting tops using infrared window channel brightness temperature gradients [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2010, **49**(2): 181–202.
- [59] Mecikalski I R, Bedka K M. Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery [J]. *Mon Wea Rev*, 2006, **134**(1): 49–78.
- [60] Mecikalski I R, Bedka K M, Paech S J, et al. A statistical evaluation of GOES cloud-top properties for nowcasting convective initiation [J]. *Mon Wea Rev*, 2008, **136**(12): 4899–4914.
- [61] 赵文化, 单海滨. 基于红外窗区与水汽通道对流云团识别方法研究 [J]. *气象*, 2018, **44**(6): 814–824.
- [62] 许健民, 张其松. 卫星风推导和应用综述 [J]. *应用气象学报*, 2006, **17**(5): 574–582.
- [63] Inoue T. On the temperature and effective emissivity determination of semitransparent cirrus clouds by bi-spectral measurements in the 10 μ m window region [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1985, **63**(1): 88–99.
- [64] Inoue T. A cloud type classification with NOAA 7 split-window measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, **92**(D4): 3991–4000.
- [65] Hamada A, Nishi N, Iasaki 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 [J]. *Scientific Online Letters on the Atmosphere Sola*, 2008, **4**(1): 57–60.
- [66] Hamada A, Nishi N. Development of a cloud-top height estimation method by geostationary satellite split-window measurements trained with cloudsat data [J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2010, **49**(9): 1559–1568.

- 2035–2049.
- [67] 刘诚, Bagtasa G, Kuz 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 [J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(4): 301–305.
- [68] Joro S, Dybbroe A. Validating the AVHRR cloud top temperature and height product using weather radar data. National institute of water and atmospheric research, New Zealand & SMHI, visiting scientist report [EB/OL]. www.nwcsaf.org/web/guest/vsa2, 2004.
- [69] Heidinger A K, Pavolonis M J. Gazing at cirrus clouds for 25 years through a split window. Part I : methodology [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 48(6): 1100–1116.
- [70] 梁玉冰, 李万彪, 黄亦鹏. 利用分裂窗直方图法对半透明云云顶高度的反演研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 44(3): 461–472.
- [71] 董焱, 鲍艳松, 许丹, 等. 基于 FY4A–AGRI 反演东北地区云顶高度 [J]. 上海航天, 2021, 38(6): 8–35.