

文章编号: 1672-8785(2010)11-0001-05

云顶高度的天基光学遥感及反演方法综述

原育凯 张永合 尹增山

(上海微小卫星工程中心, 上海 200050)

摘要: 确定大气中的云参数对于大气物理及气候研究具有重要意义。这些参数一般难以由测量直接得出, 而必须基于相关的可测物理量进行反演后才可得出。通过分析云的天基观测方式, 发现云的大气路径长度、云顶气温或气压以及云组成的微观特性可用来进行云高遥感与反演。文献调研表明, 实际中使用的方法可以分为成像几何关系和通道辐射特性两大类: 前者依赖于成像过程中得到精密控制的光源、目标和遥感器的空间方位信息; 后者利用定量化的遥感能够准确地获得地物目标的辐射量值信息, 如果再结合多光谱或高光谱手段, 便能够得出详细丰富的云团信息。同时分别介绍了八种实用化方法。

关键词: 云顶高度; 遥感; 反演

中图分类号: P414.27 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.11.001

Overview of Space-based Optical Remote Sensing and Retrieval of Cloud-top Height

YUAN Yu-kai, ZHANG Yong-he, YIN Zeng-shan

(Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 200050, China)

Abstract: The determination of the cloud parameters in atmosphere is of importance to the study of atmospheric physics and climate. These parameters are difficult to be derived directly in actual measurement and should only be derived after some related measurable physical factors are retrieved. Through analysis of space-based cloud observation, it is found that atmosphere path length, cloud-top temperature or pressure and the micro composition of different clouds can be used in the remote sensing and retrieval of cloud-top height. Some references show that the practical methods can be divided into two classes: the method using the geometry of imaging and the one using spectral radiation characteristics. The former relies on the space orientation of the light source, target and sensor controlled precisely during imaging and the latter relies on the quantitative radiation values of ground objects. When combined with the multispectral or hyper-spectral technology, they can derive abundant cloud information. Eight methods are presented.

Key words: cloud-top height; remote sensing; retrieval

1 引言

云是一种常见的大气现象。它是由漂浮在空中的大量微小水滴、冰晶或两者混合组成的

可见聚合体。云的分布占据了大约 71% 的海洋面积和 57% 的陆地面积^[1]。确定大气中的云参数对于大气物理及气候研究具有重要意义。云参数主要包括光学厚度、可见光反照率、红外发

收稿日期: 2010-06-21

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KGCX1-YW-16)

作者简介: 原育凯 (1979-), 男, 山西晋城人, 助研, 主要从事航天任务分析与系统设计、遥感仪器设计方面的研究。E-mail: ykyuan@ustc.edu

射率、液态水含量、几何高度以及厚度等。这些参数一般难以由测量直接得出，而必须基于相关的可测物理量进行反演后才可得出^[2,3]。

不同高度的云层表现出各自的物理特性，如气压、温度、光学厚度和微观组成等。这些特性相互关联，互为验证，其应用非常广泛。通过地面设备测量云顶或云底高度的常用手段包括激光或微波雷达^[2,4,7]、立体成像^[2,3,5]和大气吸收光谱技术^[3,10]等。自从卫星进入太空以来，天基观测中的光学遥感手段因具有大视场和高时空、光谱及辐射分辨率的优势而成为了云参数反演中的重要手段。星载仪器可通过测量地表、大气和云的反射、散射及发射特性来获得云的物理参数。

2 云高反演的物理基础

云的特性参数依赖于它所处的大气环境。大气的压力、温度及化学组成等因素会影响云的物理特性。图 1 显示了大气中不同高度的云之间的区别。一般来说，低云的气压接近地表，其温度较高，液态水含量高。随着高度的增加，气压会降低，温度也会随之降低，液态水便会逐渐凝结成冰晶。

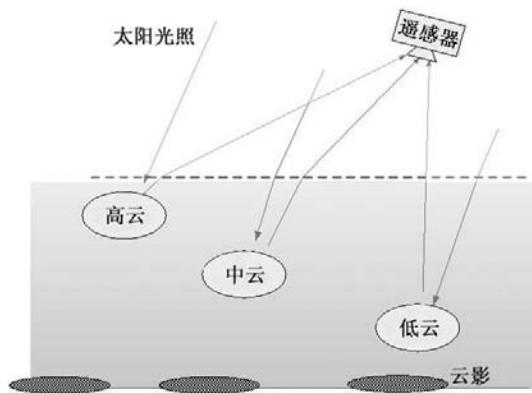


图 1 基于卫星遥感的云观测示意图

从图 1 中可以看出，在区分不同高度的云时，云到遥感器的距离是可以利用的主要几何特性。其他的物理特性包括：

- (1) 辐射传输过程中经历的不同大气路径长度；
- (2) 随着高度的增加，对流层中的气温及气压降低；

(3) 温度与气压变化导致云中水的相态含量发生改变等。

基于卫星的光学遥感手段可以较为直接地利用成像几何关系，也比较容易获得各通道的亮度图像（通过定量化处理后即为云顶的光谱辐亮度）。这也是进行云高反演的两条主要技术途径——成像几何关系和通道辐射特性。

3 成像几何关系

利用成像几何关系进行云高反演的方法依赖于成像过程中得到精密控制的光源、目标和遥感器的空间方位信息。对于光学成像，先要对光学系统进行畸变校正，然后再用云影法或立体法进行云高反演。此外，激光测距也可作为一种遥感方式用来确定云的高度。

3.1 测距法

在云层的光学厚度满足一定阈值的情况下，可以利用星载激光雷达的回波进行激光测距。激光测距本身具有很高的精度，但由于卫星平台的定轨定姿能力和空间载荷技术有限，其整体测量精度会受到限制。激光测距的测量效率较低，每个瞬时视场只能覆盖较小的范围，因而用激光对大范围云顶进行测距会非常耗时。此外，激光测距的距离一般在数百甚至上千千米量级上，这对激光功率的要求比较高。

3.2 云影法

云影法是人们较早提出的云顶高度测量方法之一^[3,10]。它是利用已知的云、太阳和卫星的方位以及云影长度来计算云顶高度的。该方法的使用受到诸多限制：成像时需要三者具备合适的空间位置关系；需要辨别是云影还是低反照表面；云影区不能被遮挡等。云高 H 的计算原理如图 2 所示。

$$H = \frac{D\theta}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (1)$$

式中， D 为卫星到目标点的距离， θ 为云影的视场角， α 和 β 分别为太阳和卫星的天顶角。

3.3 立体法

当以不同视角对同一目标进行同时或近同时观察时，视角的差异会导致同一目标在不同的观测资料中出现视差偏移现象。利用这个视差值和

遥感器的位置就可以反演出云顶的高度值。

立体法得到的是几何学上的直接测量值，其实现原理相对比较容易。该方法的局限性在于：首先，反演精度受制于空间分辨率，在波段限制于红外的夜间，由于空间分辨率较低，其反演精度有限；其次，进行同步观测有一定的难度，立体像对的观测时差会影响反演精度；此外，它需要有至少两颗卫星协同工作，或是由同一卫星在不同时刻对同一目标进行成像，占用的资源较多。

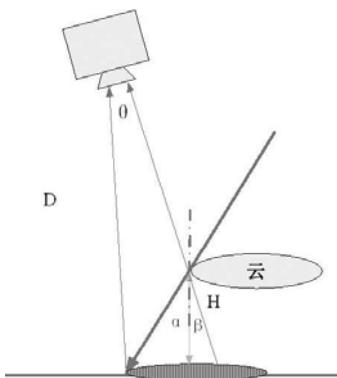


图 2 利用云影进行云高反演的原理图

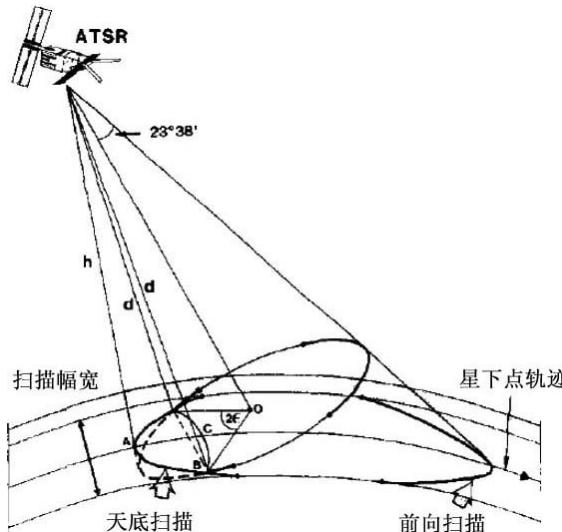


图 3 ATSR 的立体成像示意图

国外已经开展了利用 GMS 与 GOES 双星的图像对进行立体云高反演的研究工作。欧洲 ERS 系列搭载的沿轨扫描辐射计 ATSR 具有前视 55° 和星下点两个视场，能够实现立体成像^[2,5]，其 0.65μm、1.61μm 和 10.85μm 三个波段可以用来进行云顶高度反演。国内则有人利用风云二号多星进行了立体云高反演工作^[11,12]。

4 通道辐射特性

定量化遥感能够准确地获得地物目标的辐射量值信息，如果再结合多光谱或高光谱手段，它便能够得出详细丰富的云团信息。但这些信息一般只能间接反演云高，而且其反演精度与认知水平和模型精度均有关。这种云高反演方法主要借助于以下物理量：

(1) 温度。基于云的黑体辐射特性，根据光谱辐亮度进行亮温反演，进而依据大气的温度廓线得出云高，其中一般采用中长波红外数据。

(2) 大气路径长度。大气中的某些特征吸收谱线具有随大气路径增加而线性增强的特性。这些线性谱线可作为距离测量的间接手段，用以进行云高反演。值得注意的是，由于大气成分复杂、变化幅度很大以及路径上的气压为变量等因素，辐射传输模型较为复杂。

(3) 微观特性。高云因温度低而导致其冰晶含量高，微粒尺度较大；低云的温度较高，则其水汽含量高，微粒尺度较小。根据各类尺度微粒的不同辐射或散射特性有望实现云高反演。

以上物理量的测量及云参数反演的模型化具有较大的难度，下面介绍几种比较实用的方法。

4.1 单通道及多通道反演亮温

亮温是指与实际物体具有相同辐射能量的黑体温度。实际物体的发射率通常小于黑体，反演亮温往往低于实际温度。云高仅凭亮温无法确定，而必须结合当时当地的大气温度垂直廓线资料通过查表得出，其精度则受反演亮温和温度廓线两个因素制约^[4]。

单通道及多通道反演亮温方法主要是利用 3μm ~ 4μm 及 10μm ~ 12μm 大气红外窗口的辐射数据来确定云顶高度的。该方法假定云的发射率为 1，然后根据辐射能量解算云顶亮温。

在上世纪 70 年代的遥感技术发展早期，仪器的性能指标普遍较低，人们提出了依靠单个较宽的长波红外谱段反演亮温并结合地面探空仪数据来反演云高的方法，该方法一般选用 10μm ~ 12μm 红外波段。对于大气中复杂的云宏观现象和云微观物理特性，该波段显然缺乏足够的技术手段，因此其应用受到了很多限制，反演精

度也很低^[1,10]。

欧洲空间局(ESA)提出了一种利用Meteosat卫星的红外和水汽通道资料确定高云和薄云高度的客观方法。该方法根据云的辐射率和每个通道测得的背景辐射率,使用相关公式计算出云顶温度。假定卷云在红外和水汽通道的发射率相同,则即使卷云的发射率未知,人们也能得到云顶温度和高度。但由于水汽通道仅能测得对流层中层和上层的辐射率,所以该方法仅适用于确定较高云层的云顶高度^[10]。

此种方法依赖于云辐射特性的先验知识、云周围的温度场分布以及云团的重叠率等,并且需要假定云团满足局地热力学平衡条件。但是这些条件通常难以完全具备,得到的云顶高度甚至会出现数公里的误差。

4.2 分裂窗方法

分裂窗方法将原本一个较宽的通道分成两个相邻通道。两个通道分别反演出的亮温差值被定义为亮温差(BTD)。

根据统计特性可知,较高的卷云在可见光通道难以发现,它在11μm处的亮温也较低,但其11μm与12μm的BTD却较大,可以被识别出来;而较低的积云在11μm处的亮温较高,但其BTD较小。因此,用11μm处的亮温及11μm与12μm的BTD构成二维直方图,便可以对云高进行分类^[9]。

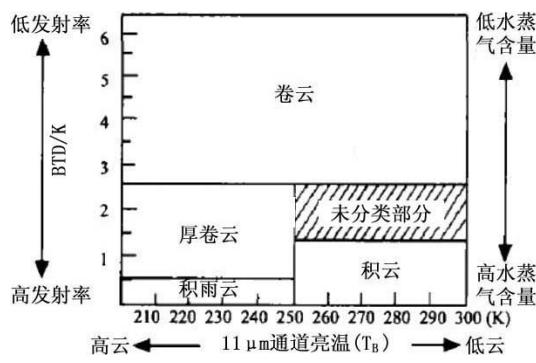


图4 云分类的二维直方图

目前,国内外的GMS-5、风云二号等卫星都设有红外分裂窗通道,以提高云检测效率。

4.3 大气吸收谱线反演气压

大气吸收谱线方法是根据大气物理特性对辐射传输路径进行建模,并通过特定谱段的辐射

量来反演具体目标的高度的。它所依赖的两个物理量为吸收谱线线性度及其大气路径。根据业务化的TOVS大气廓线,云顶温度可以转换成云顶气压。云高也可以用三个气压区间区分开来(分界值通常选为440hPa和680hPa^[1])。

P_{cld} (hPa)				Z_{top} (km)
180	卷云	卷层云	积雨云	6
310				
440	高积云	高层云	乱层云	3
560				
680	积云	层积云	层云	0
800				
1000	0	1.3	3.6	23
		0.5	9.4	60
			0.95	
				τ
				ε

图5 根据卫星遥感观测数据得到的云分类,其主要依据为云顶高度 Z_{top} 、气压 p_{cld} 、光学厚度 τ 或有效发射率 ε

国际卫星云气候计划(ISCCP)很早就开展了结合静止气象卫星和极轨气象卫星的雷达数据来获得云顶气压的研究工作^[1],而不同卫星的数据融合需要精密的反演模型。日本ADEOS系列及法国PARASOL卫星上搭载的地球反射率偏振及方向性载荷POLDER,则是利用O2-A波段(763nm)吸收特性来推算云顶气压的^[3]。

该方法对仪器的工作波长、光谱分辨率和定标精度的要求较高。

4.4 二氧化碳分层方法

该方法是在遥感通道数逐渐增加的情况下,利用15μm以内长波红外谱段中几个CO₂部分吸收带数据来反演云高的。其中,靠近15μm的谱线仅对高云敏感,而偏短一些波长的谱线则对中云敏感。因此,该方法在中高云检测上的使用非常有效。

GOES卫星上的大气垂直探测载荷VAS有三个CO₂吸收峰。把三个通道中两个通道的云和其附近晴空的辐射率差值的比率列成辐射传输方程,并在频率接近的三个CO₂通道发射率相等的假设条件下消去发射率值,人们便可以利用CO₂通道测量的云和晴空辐射率以及由探空仪或VAS得到的大气探测值按50hPa的增量计算出气压高度。

MODIS在该谱段具有多个可用通道,显著推动了此项技术的发展。现在使用较多的谱段有(括号中为MODIS中的波段编号):

- (1) $14.2\mu\text{m}/13.9\mu\text{m}$ (波段 36/35) ;
- (2) $13.9\mu\text{m}/13.6\mu\text{m}$ (波段 35/34) ;
- (3) $13.6\mu\text{m}/13.3\mu\text{m}$ (波段 34/33) ;
- (4) $13.9\mu\text{m}/13.3\mu\text{m}$ (波段 35/33) ;
- (5) $13.3\mu\text{m}/11\mu\text{m}$ (波段 33/31) 。

二氧化碳分层方法的优点是它在测量云顶高度时不用考虑大气压力高度，并可在理论上获得更为直接的结果。此外，该方法允许对由各个通道获得的高度值进行比较，从而可选择最佳结果^[6,7,10]。

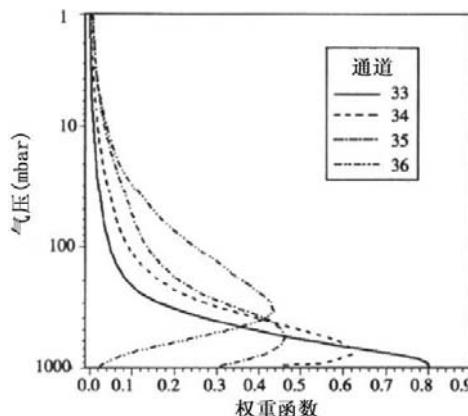


图 6 二氧化碳分层方法的权重函数

4.5 颗粒特性方面

云中的微粒尺度一般在微米到百微米量级。如果云顶温度 $T_{cld} \geq 260\text{K}$ ，模型认为云主要由平均半径为 $10\mu\text{m}$ 的球状液态小水滴组成；而当 $T_{cld} < 260\text{K}$ 时，模型则认为云主要由平均半径约为 $30\mu\text{m}$ 的冰晶组成^[1]。在可见光及红外波长的作用下，它们容易产生尺度较小的瑞利散射和尺度接近的米氏散射。

国外的研究人员已根据 AVHRR 载荷的可见光及 $3.7\mu\text{m}$ 辐射量对云顶小水滴的微观尺度特性进行了反演，并正在研究针对冰云的方法^[1]。POLDER 采用的瑞利法能够基于云顶分子在 443nm 处发生散射的偏振特性来反演云高。CALIPSO 的一台偏振激光雷达，则是利用冰云 / 水云的不同相态来反演云的垂直廓线和提供云的垂直分布的^[3,13]。

5 结论

从以上资料可以看出，目前云高反演较多依赖于长波红外通道数据，或者需要多颗卫星

的配合，而且往往需要建立复杂的辐射传输模型。这些方法的处理流程冗长，限制了云高信息获取的实时性。随着应用中对实时性要求以及云高这一现象机理的深入研究，云高反演技术有望逐步在短波长和单星、单视角方面得到新的发展。

参考文献

- [1] M Hantel. Observed Global Climate [EB/OL]. <http://www.springer-materials.com>, 2005.
- [2] A J Prata, P J Turner. Cloud-Top Height Determination Using ATSR Data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1997, **59**(1): 1–13.
- [3] James J Simpson, Timothy McIntire, Zhonghai Jin, et al. Improved Cloud Top Height Retrieval under arbitrary viewing and illumination conditions using AVHRR Data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2000, **72**(1): 95–110.
- [4] Shawn Hollars, Qiang Fu, Jennifer Comstock, et al. Comparison of Cloud-Top Height retrievals from Ground-based 35GHz MMCR and GMS-5 Satellite observations at ARM TWP Manus Site [J]. *Atmosphere Research*, 2004, **72**(1): 169–186.
- [5] Catherine Naud, Jan-Peter Muller, Eugene E. Clothiaux. Assessment of Multispectral ATSR2 Stereo Cloud-Top Height Retrieval [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **104**(3): 337–345.
- [6] Robert E Holz, Steve Ackerman, Paolo Aantonelli, et al. An Improvement to the High-Spectral Resolution CO₂-Slicing Cloud-Top Altitude Retrieval [J]. *American Meteorological Society*, 2006, **23**(5): 653–670.
- [7] 王青梅, 张以谋, 刘铁根, 等. 一种便携式激光测云仪的云底高度反演方法 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(9): 1312–1316.
- [8] 林琳, 黄思训, 杜华栋. MODIS 数据的云顶高度反演 [J]. *地球信息科学*, 2006, **8**(2): 106–109.
- [9] 刘诚, Gerry Bagtasa, Hiroaki Kuze, 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.
- [10] 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.
- [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(自然科学版)*, 2008, **44**(1): 129–134.
- [12] 周非非, 周毓荃, 王俊, 等. FY-2 卫星反演的云顶高度与多普勒雷达回波顶高的关系初探 [J]. *气象*, 2010, **36**(4): 43–50.
- [13] 严卫, 杨汉乐, 周兴旺. A-Train 卫星编队及其在云研究领域中的应用 [J]. *遥感信息*, 2008, **23**(2): 93–96.