

周毓荃, 欧建军. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J]. 气象, 2010, 36(11): 50-58.

利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究^{*}

周毓荃^{1,2} 欧建军²

1 中国气象科学研究院, 北京 100081
2 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

提 要: 云的垂直结构特征, 无论是对天气、气候还是人工影响天气都十分重要, 但业务上直接有效的观测手段十分缺乏。本文通过对比分析, 确定了相对湿度阈值法分析云垂直结构的方法; 利用我国气象业务探空秒数据, 计算分析了不同云垂直结构, 将得到的分析结果同 CloudSat 云雷达实测云垂直结构进行多个例的对比分析, 验证了相对湿度阈值判断云垂直结构方法的可行性, 及利用我国业务探空资料分析云结构的可用性; 为业务应用, 开发了探空秒数据的实时读取和计算方法, 设计制作了云垂直结构探空分析显示图, 初步形成基于我国业务探空的云结构分析技术; 并实时将这些技术应用到我国 60 周年国庆期间几次不同天气系统云结构的时间和空间演变特征分析中, 得到有意义的结果。

关键词: 探空, 云垂直结构, 云分析应用

The Method of Cloud Vertical Structure Analysis Using Rawinsonde Observation and Its Applied Research

ZHOU Yuquan^{1,2} OU Jianjun²

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
2 School of Atmospheric Physics, NUIST, Nanjing 210044

Abstract: The vertical structure characteristics of clouds play an important role no matter in the weather, in the climate or in the weather modification, while there are few direct and valid observation methods in the meteorological operation. In this paper several Cloud Vertical Structure (CVS) analysis methods by rawinsonde observation (RAOBS) are compared and from which the relative humidity (RH) threshold method is chosen to analyze the CVS. The second-data of our national RAOBS network are used to analyze multi-case cloud vertical structure, which are then compared with CVS from CloudSat-borne cloud radar. Results prove the feasibility to identify CVS by using a relative humidity threshold, and the usability of this method in routine work. For operational applications, the methods of reading and calculating RAOBS are developed, the pictures of analyzing CVS are designed, so that a cloud structure analysis technique is founded based on RAOBS of China. This technique is used in studying temporal and spatial evolutions of cloud system coupling with different weather systems during the 60th anniversary national period day, and valuable results are achieved.

Key words: rawinsonde observation, cloud vertical structure (CVS), application of cloud analysis

引 言

形态各异、尺度不一的云, 覆盖着全球 50% 以上的天空。对于天气和气候的变化, 云不仅是指示

器, 而且是调节器。云在形成过程中释放的潜热对上升运动及云自身的发展与维持有极大的作用。云与辐射的相互作用, 对天气变化过程有重要的影响, 对气候变化的影响更不容忽视^[1]。不同的云存在不同的辐射强迫, 低云起冷却作用, 高云通常起温室效

^{*} 国家“十一五”科技支撑课题(2006BAC12B07); 中国气象局 2009 年新技术推广项目(CMATG2009MS09)
2009 年 11 月 26 日收稿; 2010 年 8 月 20 日收修定稿
第一作者: 周毓荃, 研究方向为云降水物理、人工影响天气和综合探测分析. Email: zhouyq05@163.com

应,因此获得云体高度及其在时空上的变化对于研究全球气候变化有着重要意义^[2]。大量的实验和观测证实,云的垂直结构能够显著地影响大气环流^[3]。云是人工影响天气催化作业的主要对象,不同云的宏微观结构特征及其演变规律,对准确识别作业条件、有效捕获可播云区,科学实施人工播云催化尤为重要^[4]。因此,云的特征特别是垂直结构特征,无论是对天气、气候还是人工影响天气都十分重要。

然而,关于云垂直结构(包括云底、云顶、云厚以及多层云的垂直分布)的观测手段十分匮乏,目前主要靠地面人工观测,以及少量的卫星、激光雷达、激光云幕测量仪和云雷达等的观测。地面人工观测受人为主观因素影响较大,且一般只能获取云底信息,对多层云很难观测到准确的位置,特别在夜间或者能见度不好时观测更难确定;激光云幕测量仪主要获取的是云底信息;而卫星观测一般只能获取云顶信息,对低云的探测无能为力。当前,对云最有效的观测是 3 mm 的云雷达,但短期内很难实现业务布网观测。气象观测中另一重要的观测手段探空,它可获取由地面到 30 km 高空各层温、压、湿、风随高度的变化信息。当空中水汽达到饱和或过饱和时就会凝结形成云,因此,探空湿度的观测对云应该有指示意义。1962 年,Essenwanger 等^[5]利用地面人工观测和探空资料对大气中不同高度云出现的频率进行了初步研究,1991 年 Poore^[6]利用地面观测和探空资料探讨了云层的厚度,1995 年 Poore^[7]用探空的湿度(露点温度差)廓线判定云顶和云底高度,同年, Wang 等^[8]改进了 Poore 的方法,提出用相对湿度的阈值以及云顶和云底相对湿度负和正的跳跃变化来判断云层。1996 年 Chernykh 等^[9]又提出了一种新的方法,利用探空的温度和湿度二阶导数随高度的变化判断云层的垂直结构。从云物理学角度看,在液滴云雾中相对湿度应该接近于 100%,而在冰云或冰水混合云中相对湿度可在水面到冰面饱和之间。所以利用相对湿度的探测值来确定云的垂直结构有一定的理论基础。就目前所提出的探空分析云的方法,关键是要得到实际云结构观测的印证才能成为一种可用的方法。

本文首先对比分析已有探空分析云垂直结构的方法,筛选相对湿度阈值法作为云垂直结构分析的方法;利用我国业务布网的 L 波段探空观测秒数据资料,进行云垂直结构的分析,将得到的分析结果同 CloudSat 云雷达实测云垂直结构进行多个例的对

比分析,检验相对湿度阈值判断云垂直结构方法;在对比的基础上开发形成基于我国业务探空的云结构分析技术,并实时应用到 60 周年国庆期间云结构分析预测中,为国庆气象保障提供帮助。

1 资料介绍

本文研究将涉及我国业务布网的 L 波段探空、CloudSat 云雷达(3 mm)及地面观测资料等,首先对涉及的资料进行简单的介绍。

1.1 我国业务布网的 L 波段探空秒数据

我国业务布网的高空气象探测系统包括 L 波段高空气象探测系统和非 L 波段高空气象探测系统(59-701 高空气象探测系统,400M-701 高空气象探测系统)。其中 L 波段高空气象探测系统是由我国自行研发的 GFE(L)1 型二次测风雷达和 GTS1 型数字探空仪组成,采用二次测风雷达测距体制,能够连续自动测定高空气温、湿度、气压、风向和风速等气象要素。GTS1 型数字探空仪采样周期为 1.2 秒(因此其数据也称为探空秒数据),每分钟的采样频率约为 50 次,按照每分钟 400 m 升速算,L 波段探空数据的空间垂直分辨率为 8 m,具有高分辨率和实时采集的能力^[10-11]。截止 2009 年 10 月,我国已有 91 个探空站升级为 L 波段高空探测系统。这些分布在全国各地探空站的高精度探空数据可实时上传到中国气象局,为利用这些数据实时进行全国云垂直结构的分析提供了条件。

1.2 CloudSat 云雷达

搭载在 CloudSat 卫星上的云雷达是一个 94 GHz、3 mm 波长云剖面雷达(cloud profiling radar,简称 CPR),可以得到云的垂直结构。CloudSat 卫星位于 705 km 高度的太阳同步轨道上,卫星绕地球一周称为一个扫描轨道,每天大约绕地球 14~15 个扫描轨道。一个扫描轨道的长度大约是 40022 km,每轨有 36383 个星下像素点,每个像素点的星下点波束覆盖宽度(foot print)的沿轨分辨率是 2.5 km,横轨分辨率是 1.4 km,垂直分辨率是 500 m。每个垂直剖面每隔 240 m 获得一个扫描数据,从地面到高空共获得 125 个不同高度上的数据,即垂直探测的高度大约 30 km^[4,12]。由于 CloudSat 卫星特殊的观测轨道,云雷达(CPR)的观测资料十分有限,

需要选择同探空站时空匹配的过顶云雷达观测资料,进行探空云分析的对比验证。

1.3 地面人工观测

地面人工观测是气象最基本和最传统的观测手段,主要观测要素包括:低云、中云、高云状,低云云底高,云量,天气现象等。由于云能天信息为观测员目测,虽然其数据受观测员主观影响较大,遇到天气现象复杂及能见度不佳,以及夜间观测时数据的准确性和可靠性都会受影响。但就云的观测,依然可以作为一种观测结果对探空分析的云进行验证。

2 探空分析云垂直结构的方法

探空数据分析云垂直结构主要利用了探空所得的湿度参量,因此,湿度观测的准确性以及计算方法的准确性对云垂直结构的分析有很大的影响。探空数据分析云垂直结构目前主要有 3 种方法:一是通过温度露点差阈值进行云判断^[7];二是温度和湿度随高度变化的二阶导数判断(简称 CE 法)^[9];三是相对湿度阈值(简称 WR95 法)判断^[8]。其中:CE 法实际上是将温度露点差法和二阶导数的方法结合

起来,先用二阶导判断云层的存在,再用温度露点差检验进一步判断云层。而用温度露点差判断云层时,由于气温的不同,其阈值的选取分为三段,在判断云层垂直结构的时候不具备连续性。相对湿度阈值法最早由 Wang 和 Rossow^[8]提出,Wang 等根据 1 年的地面和探空观测对云底高度范围内的相对湿度做频率统计,得到在地面人工观测云底高度范围内湿度的频率分布,发现相对湿度 87% 处在一个显著变化的频率上,相对湿度小于 84% 的只占有个例的 25%,因此以 84%~87% 作为阈值判断云层,改进了 Poore^[7]的方法,通过对相对湿度取阈值来判断云层垂直结构。利用相对湿度阈值判断云层结构时不同温度下只有一个相对湿度的阈值,能够连续的判断云层垂直结构。L 波段探空系统探空仪采用高分子热敏电阻传感器,直接测量相对湿度值,露点温度值是反算的。而云形成的主要条件也是相对湿度趋于饱和,所以直接用相对湿度值作为云判断的阈值,比较合理。

根据 3 种探空分析云结构的原则,利用 2008 年 9 月 14 日 02 时赤峰 L 波段探空资料,分别利用 3 种方法分析了云垂直结构,并同 CloudSat 云雷达实测云结构进行了对比,见图 1。

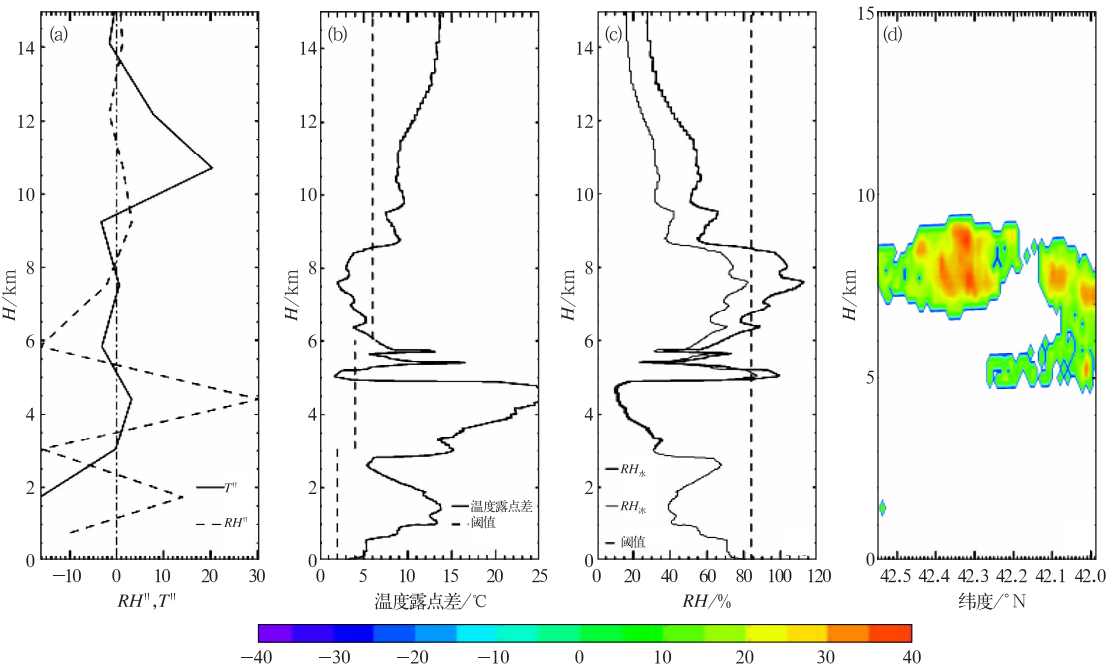


图 1 3 种探空分析云结构方法与 CloudSat 云卫星雷达反射率对比图

(a) 二阶导数法, (b) 温度露点差法, (c) 相对湿度阈值法, (d) 雷达反射率(单位 dBz, 色标以后均同)

Fig. 1 Three methods of CVS analysis using RAOBS compared with the reflectivity observed by the CloudSat

(a) method of second derivative, (b) method of dew-point deficit, (c) method of RH threshold, and (d) reflectivity observed by the Cloudsat (unit: dBz, color bar same as this hereafter)

图 1 是 3 种探空分析的云结构与 CloudSat 云雷达实测云结构的对比。其中:(a) 为二阶导数法分析云结构;(b) 为温度露点差法分析云结构;(c) 为相对湿度阈值法分析云结构;(d) 为 CloudSat 云雷达观测云反射率图。

由图可以看出 3 种方法均能够分析出云的垂直结构。图 1a 中温湿度二阶导数法一共分析出三层云结构,分别在 3.3 km、7.5 km 和 12.5 km 高度,而且云很薄,与云雷达探测结果不一致。温度露点差法和相对湿度法都能分析出双层云结构,两者观测的结果与云雷达比较一致,相比之下,相对湿度法同 CloudSat 云雷达观测的云更接近。同时,该时次地面人工观测为:云状密卷云,云量 6,低云无,与相对湿度法探空观测分析云基本一致。该个例中,探空站点距离 CloudSat 轨道距离小于 30 km。

综合分析 3 种探空分析云结构的方法,优选相对湿度阈值法分析云结构的方法,具体需包括 3 个方面:(1) 不同温度下相对湿度的合理计算,当气温低于 0℃时,要按照冰面饱和水汽压计算相对湿度,即利用实际水汽压除以冰面的饱和水汽压得到新的相对湿度;(2) 云层中相对湿度最大值要大于 87%,最小值要不小于 84%;(3) 相对湿度在云顶有负的跳变,在云底有正的跳变。

3 探空云分析的业务实现和云垂直结构直观显示图的设计

为实现探空分析云结构方法的业务应用,直观显示云结构,开发了全国探空秒数据的实时读取和计算,并进一步设计制作了探空云结构分析图(见图 2)的方法。这里以北京 2008 年 8 月 20 日 14 时探空分析云垂直结构图为例(见图 2)。

图上横坐标为温度和相对湿度共用,左纵坐标为高度(单位:km),右纵坐标为气压对数坐标(单位:hPa),其中一共有 4 条廓线,分别是露点温度 T_d (点虚线),温度 T (实线),水相相对湿度 RH_w (细实线)及冰相相对湿度 RH_{ic} (粗实线),而虚线表示云阈值线,如果相对湿度值大于云阈值就表示有云存在。纵坐标旁还给出了高云、中云、低云的高度范围及 0℃层高度。由图可以看到,按照相对湿度阈值法条件:云内部最小相对湿度不小于 84%,最大相对湿度不小于 87%,且在云顶和云底相对湿度有跳变,本个例探空分析的云层一共有两层。两层云底

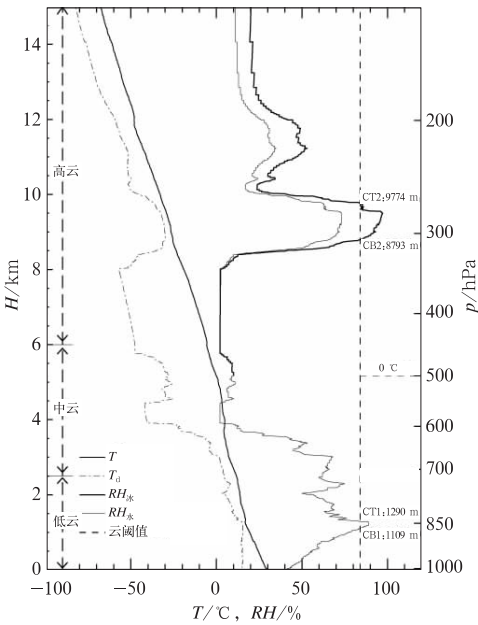


图 2 北京 2008 年 8 月 20 日 14 时探空分析云垂直结构图示
Fig. 2 The cloud vertical structure of RAOBS (14:00 BT August 20, 2008 in Beijing)

高分别为 1109 m 和 8793 m,分别为低云和高云,这与该个例地面观测的低云淡积云(云底高 1000 m),高云密卷云一致。

实际应用时,根据需要实时读取垂直分辨率达 10 m 左右的全国 L 波段探空站探空秒数据资料,按照优选的温度阈值算法计算各层相对湿度,利用相对湿度阈值法判断分析云结构,自动绘图,就可以得到直观的云垂直结构图。

4 探空分析云垂直结构及其与 CloudSat 云雷达观测对比验证

自 WR95 法判断云层垂直结构方法提出以来,以往检验的方法主要还是靠地面人工观测,该方法对低云云底检验还比较有利,但对于中高云及云夹层的验证就有很大的局限。3 mm 云雷达是云垂直结构观测最有效的方法,因此,这里利用 CloudSat 云雷达对 L 波段业务探空分析云结构的结果进行对比检验。

受 CloudSat 云雷达卫星轨道限制,载有 3 mm 云雷达的 CloudSat 卫星过顶我国的时间大多是在凌晨 4 时左右或者下午 4 时左右,而常规的探空只是在早上 8 时和晚上 20 时,为了在时间上匹配,主

要选择凌晨 2 时或者下午 2 时加密的探空观测来进行对比检验。由于 CloudSat 卫星位于 705 km 高度,自上而下的对云层进行扫描,对于 1.0 km 以下的低云的观测会有很大的影响。而且卫星过境时轨道和探空测站也有一定的距离,所以探空和云雷达时空匹配很好的个例十分有限。限于篇幅,这里仅给出单层云和多层云两个典型个例进行对比验证。

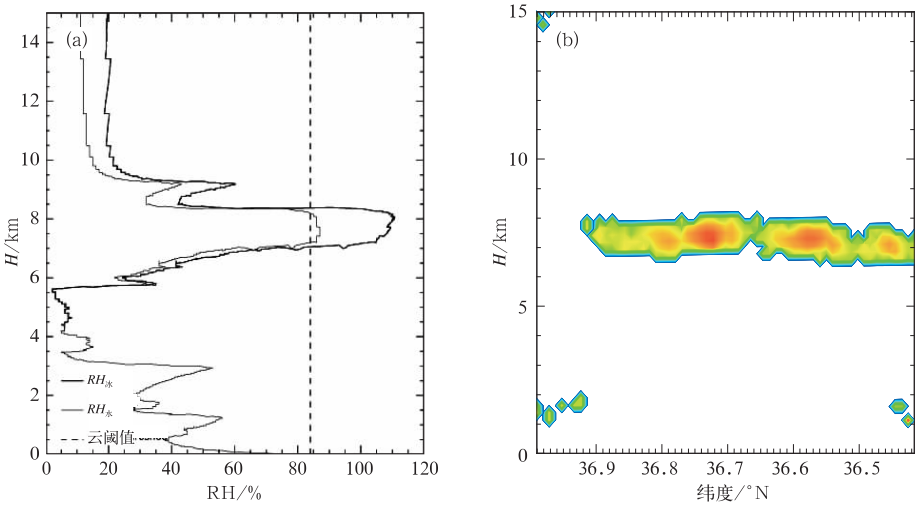


图 3 章丘 2008 年 9 月 14 日 02 时 L 波段探空(a)与 Cloudsat 卫星云雷达(b)对比图
轨道离探空站点(纬度 36.7°N)距离小于 30 km 地面人工观测:总云量 2~3,云状密卷云
Fig. 3 The L-band RAOBS (a) compared with the reflectivity (b) observed by the CloudSat at 02:00 BT September 14, 2008 in Zhangqiu
The distance from satellite orbit to sounding site (36.7°N) is less than 30 km

高云,地面人工观测的为密卷云,三者结果一致。

4.2 多层云结构探空分析同云卫星的观测验证

图 4 为大连站 2008 年 8 月 15 日 02 时 L 波段

4.1 单层云云结构的探空分析同云卫星的观测验证

图 3 为章丘站 2008 年 9 月 14 日 02 时 L 波段探空云分析与 CloudSat 卫星云雷达观测的对比图,从探空图可见,相应时刻 7~8 km 高度上有高云存在,而 CloudSat 卫星云雷达图上,7~8 km 高度也有

探空分析的云结构与 CloudSat 卫星云雷达对比图,从探空图可见,云层具有三层结构,云顶高在 11 km,第一层云底高在 1 km 高度,且在 3 km 和 9 km 高度上有夹层。而在 CloudSat 云雷达图上,纬度

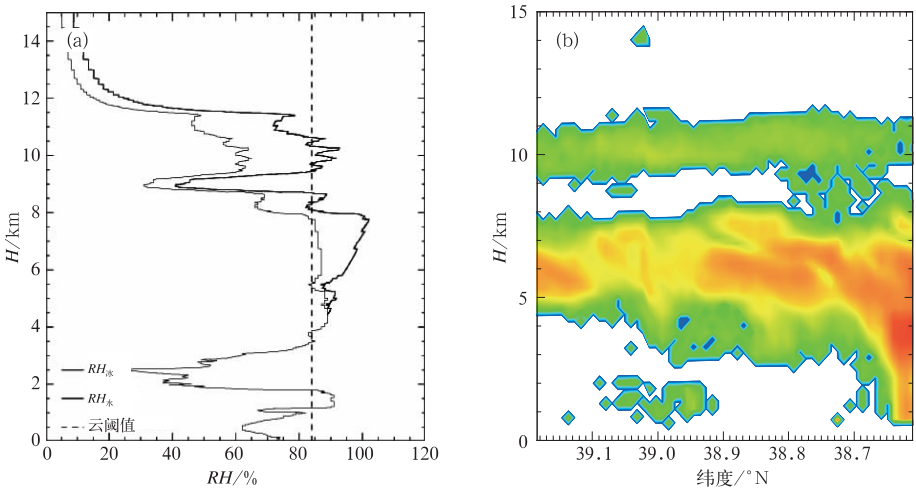


图 4 大连 2008 年 8 月 15 日 02 时 L 波段探空(a)与 Cloudsat 卫星云雷达(b)对比图
轨道离探空站点(纬度 38.9°N)距离小于 30 km,地面人工观测:总云量 10,雨层云,小雨
Fig. 4 The L-band RAOBS (a) compared with the reflectivity (b) observed by the CloudSat cloud satellite at 02:00 BT August 15, 2008 in Dalian
(The distance from satellite orbit to RAOBS site (38.9°N) is less than 30 km)

38.9°N 附近,云顶高 11 km,8~9 km 高度有夹层,低层 1~2 km 有云层出现,三层云结构与探空对应一致。地面人工观测为雨层云,并伴有小雨。

以上对比分析显示,探空分析云结构和 Cloud-Sat 云雷达观测云结构基本一致,不管是单层云还是多层云,两者都具有类似的结构,只是具体的高度和厚度有一定的差别。这与探空与卫星观测的位置有很大的关系,探空气球会漂移几十千米的距离,同时轨道离站点也有一定距离,这些都能影响两者的一致性。由于 CloudSat 云雷达不能探测近地面 1 km 左右的云,相比起来探空则可以分析出整层的云结构。但是,当有些天气现象(如轻雾、雾、雨、雪等)出现时,由于低层湿度较大(超过 84%)探空也不能分析出云底高度,如果要得到云的垂直结构就需要与地面人工观测相结合。同时探空仪器的性能(滞后效应等),以及算法的合理选取等,都会对探空分析云结构的结果带来影响。最好的对比,是同时与地探空和云雷达观测对比。

5 探空分析云结构应用于 60 周年国庆云时空演变分析

通过以上方法分析可知,利用探空观测数据可以分析出云体垂直结构,那么基于全国布网的业务探空站的观测,如果对某一站点的探空数据做时间

序列的分析,可得到该站点区域内云体的时间演变的情况,如果对多探空站做空间剖面分析,就可以得到不同天气部位云系的空间结构特征,帮助了解不同天气过程的云结构特征。

5.1 60 周年国庆期间云垂直结构的时间演变

在 2009 年国庆 60 周年气象保障中,为保障国庆阅兵空中表演的观看效果,无论从云的预报还是人工消云服务等都对云结构的观测分析提出较高的需求,为更好地分析判断天气系统和云结构特征,尝试将以上给出的探空分析云结构的方法,实时应用于关注的云结构的分析中,以下针对 60 周年国庆气象服务的几次演练,对北京站 L 波段探空秒数据做时间序列分析,得到一些关于云结构演变的结果。

图 5 是北京站 L 波段探空秒数据分析的 2009 年 9 月 3 日 08 时至 9 月 6 日 20 时云顶和云底演变时间序列图(图中为探空每隔 6~12 小时一次探空云分析结果,图下给出了相应时刻地面站人工观测的天气现象等),从图上可清晰看到,此次过程多数时段云系为两层云结构,第一层云顶高一般在 6 km 以下,云底高度一般不下雨时在 1500 m 左右,下雨或轻雾时(此时云底高度采用人工观测云底高)云底接地,同地面观测天气现象吻合;第二层云(高云)不连续,云底一般在 7 km 以上,云顶在 10 km 左右。

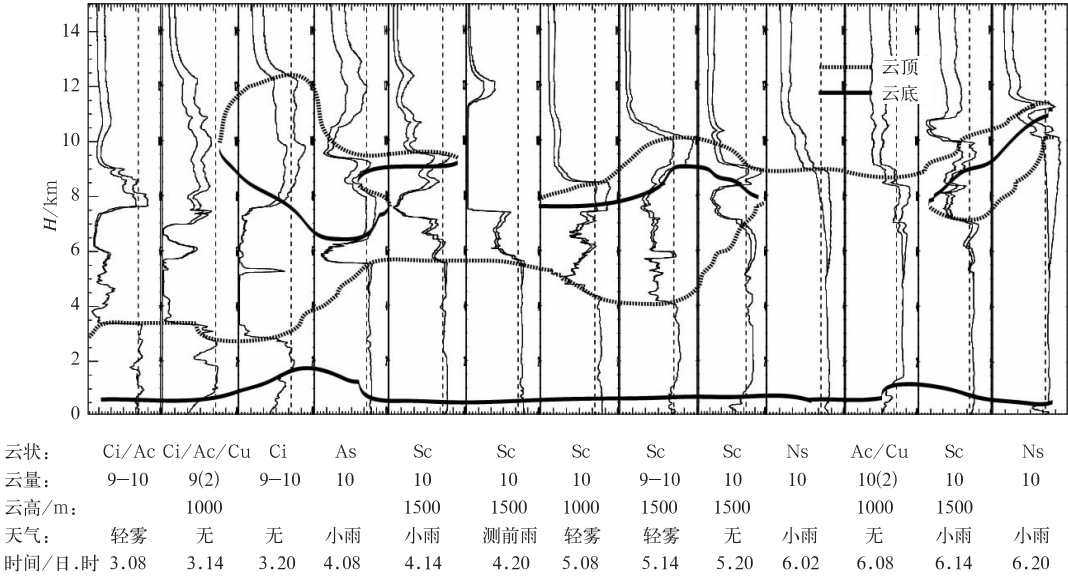


图 5 2009 年 9 月 3 日 08 时至 9 月 6 日 20 时北京 L 波段探空秒数据分析云顶和云底演变时间序列图
Fig. 5 The evolutions of cloud top and cloud base based on the L-band RAOBS second-data in Beijing
(from 08:00 BT September 3 to 20:00 BT September 6, 2009)

图 6 给出了国庆当天一次弱降水过程云结构的演变图。具体为 2009 年 9 月 29 日 02 时至 10 月 1 日 14 时北京探空云分析时间序列演变图,从图上可见,自 9 月 29 日开始到 10 月 1 日 02 时低层 2 km 以下一直维持一个高湿层,并伴随有轻雾等天气现象。从 30 日 14 时开始 9000 m 高度有高云出现,并且向下发展加厚,到 30 日 20 时有小雨出现,此时

云体已经达到最厚,到 1 日 02 时地面观测依然有小雨,随后云层开始变薄,到 1 日 08 时只有 4000~5000 m 高度有中云存在,此时已经没有降水,到 14 时已经没有云,天空放晴。整个过程与地面人工观测一致,通过该探空云结构时间序列的分析,很好地反映了国庆前夜和国庆当天云和降水的发展演变趋势。

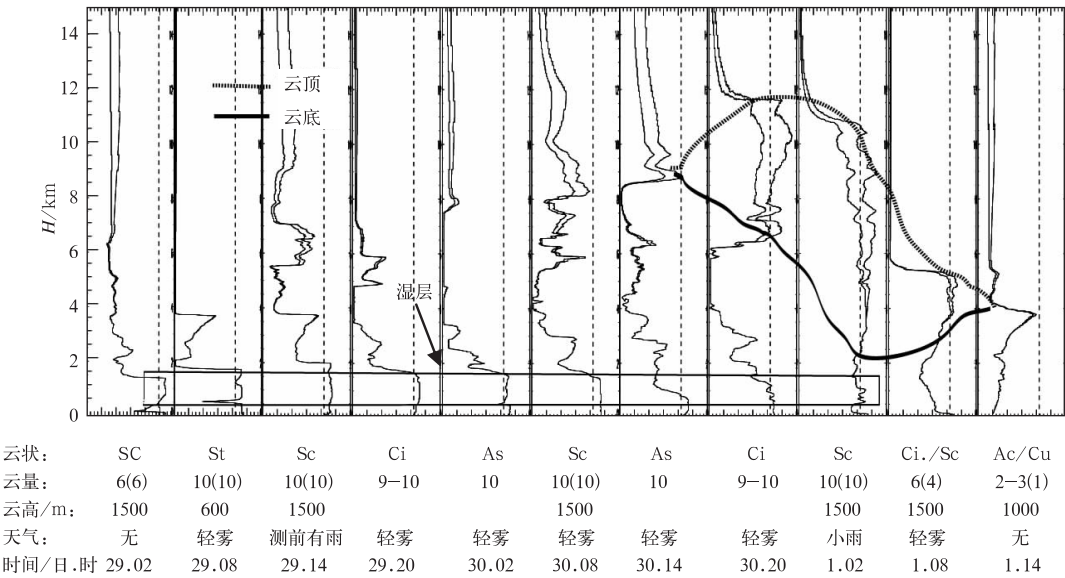


图 6 2009 年 9 月 29 日 02 时至 10 月 1 日 14 时北京 L 波段探空秒数据分析云顶和云底演变时间序列图

Fig. 6 The evolutions of cloud top and cloud base based on the L-band RAOBS second-data in Beijing from 02:00 BT September 29 to 14:00 BT October 1, 2009

5.2 60 周年国庆期间云垂直结构的空

间变化特征
利用业务布网的探空站,选择天气系统敏感区域,进行空间剖面分析,可了解不同天气系统云结构特征。选择国庆前期 2009 年 9 月 27 日一次弱冷锋天气过程,分别沿冷锋锋面和垂直于冷锋方向进行探空云结构分析。图 7 给出了 2009 年 9 月 27 日 07 时 30 分 FY2 卫星云图冷锋云系云带与空间剖面位置示意图。

从图 7 可看到平行于锋面做的剖面(图中 AB),经过的探空站为宜宾、重庆、南阳、郑州和章丘,图 8 为得到的 2009 年 9 月 27 日 08 时探空分析冷锋上云空间结构,由图可看出:该云系为冷锋云系后缘的中高云,云结构较均匀,云底平坦一般为 5 km 的;中云云底以下湿度变化明显,近地层有明显的湿层,低云不明显,伴随有轻雾。

从图 7 可看到垂直于锋面做的剖面(图中 CD)

经过了西安、南阳、阜阳、安庆、衢州等站点,图 9 为探空分析得到的从锋后到锋面前锋面云的空间结构。从图上可以清晰看出,锋后和锋上为单层云结

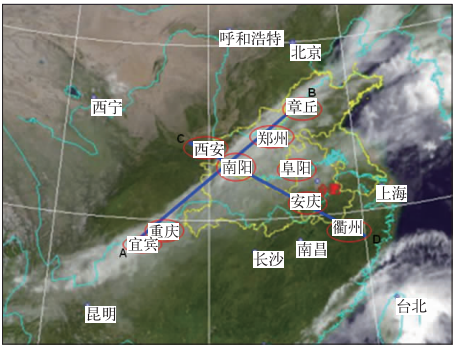


图 7 2009 年 9 月 27 日 07 时 30 分 FY2C 卫星云图冷锋云系与空间剖面图
Fig. 7 The cold front cloud system observed by FY2C and the spatial profiling line at 07:30 BT September 27, 2009

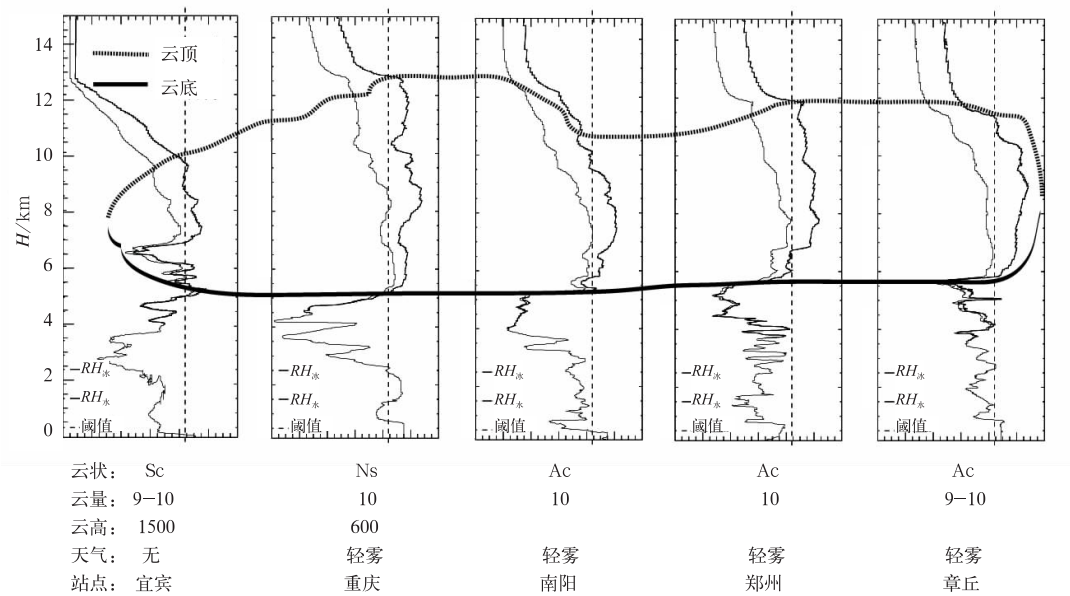


图 8 2009 年 9 月 27 日 08 时探空分析云结构沿冷锋云系空间剖面图
Fig. 8 Cloud structure cross-section diagram along the cold front cloud system
analyzed by RAOBS at 08:00 BT September 27, 2009

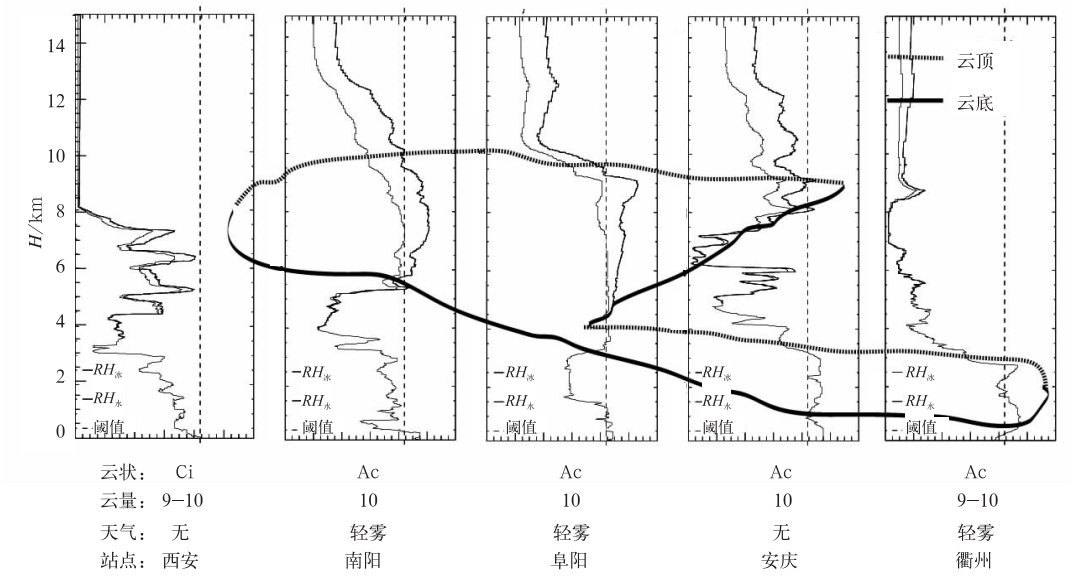


图 9 2009 年 9 月 27 日 08 时探空分析云结构垂直冷锋云系空间剖面图
Fig. 9 The cold front cloud system cross-section diagram analyzed
by RAOBS at 08:00 BT September 27, 2009

构,以中高云为主,云底 5 km,云顶 10 km,锋面前部云体分离变为更弱的双层云结构,分别以较薄的低云和高云出现,云体有明显的夹层,大多数站只是有轻雾,没有降水。因此,利用探空业务网秒数数据资料,可以根据需要对关心的天气系统做任意部位的空间剖面,通过分析不同时刻、不同位置的云系的结构,对深入了解不同天气系统垂直结构特征、完善动

力和云相结合的多尺度天气概念模型,更精确地实时进行天气和云降水的分析,具有重要的意义。

6 结 语

本文首先通过对比研究,给出探空相对湿度阈值法分析云结构的方法;利用我国业务站网探空秒

数据,分析多个例的云垂直结构,并同 CloudSat 云雷达实测云垂直结构进行对比分析,验证了探空相对湿度阈值法判断云垂直结构方法的可行性及我国业务探空资料分析云结构的可用性,在此基础上,初步应用于 60 周年国庆期间几次不同天气系统云结构的时间和空间演变特征分析,得到一些有意义的结果。

(1) 利用探空秒数据资料根据不同温度计算相对湿度(水面和冰面),然后依据其相对湿度廓线变化特征即以相对湿度 84% 的阈值为云区,能清晰分辨出云顶、云底及云夹层等云结构。

(2) 利用我国业务布网的探空秒数据资料,计算分析相对湿度值得到的云垂直结构,与 3 mm 空基云雷达实测云结构进行观测对比,发现探空分析云的分层结构和高度同云卫星实测结构都很吻合,效果很好。一方面说明相对湿度阈值法分析云结构是可行的,另一方面说明我国业务布网的 L 波段探空仪器的精度用于定性分析云的垂直结构是可行的。随着探空仪性能的改进,探空分析云的精度将不断提高。

(3) L 波段探空秒数据分析的云结构同云卫星雷达的观测对比,其吻合程度,受探空站点和云卫星时间和空间匹配程度和云卫星分辨率等的影响。改用同时同地的探空和云雷达观测其探空分析云的精度和对比一致性会更好。

(4) 探空在分析云垂直宏观结构方面的主要优势是能对多层云的云底、云顶及云夹层进行观测分析,可以利用单站多时次探空资料,也可以利用多站探空资料针对天气系统做时间序列和空间剖面的云分析,可得到从低云到高云垂直结构的时间变化和云系空间结构的变化,对不同天气过程、不同部位云结构了解及天气和降水的分析预测有很好的指示意义。

(5) 以云分析为核心的探空秒数据的处理计算

及云垂直结构直观显示图的自动绘制等构成了探空云结构分析业务化分析技术,使利用探空进行云结构的实时分析成为可能。

参考文献

- [1] 邱金桓,吕达仁,陈洪滨,等. 现代大气物理学研究进展[J]. 大气科学,2003,27(4):630.
- [2] Riehard A Frey, W Paul Menzel, et al. A comparison of cloud top heights computed from airborne lidar and MAS radiance data using CO₂ slieng[J]. Journal of Geophysical Research, 1999,104(20): 24,547-24,555.
- [3] Slingo A, Slingo J M. The response of a general circulation model to cloud longwave forcing Part 1: Introduction and initial experiments[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1988, 114: 1027-1062.
- [4] 周毓荃,赵殊慧. CloudSat 卫星及其在天气和云观测分析中的应用[J]. 南京气象学院学报,2008 ,31(5):603-614.
- [5] Essenwanger O, Haggard G H. Frequency of clouds in height layers for Berlin (Tempelhof) [J]. J Appl Meteor, 1965, 1: 560-569.
- [6] Poore K D. Cloud base top and thickness climatology from RAOB and surface data[C]. Cloud Impacts on DOD Operations and Systems, 1991 Conf.
- [7] Poore K D, Wang Junhong, W B Rossow. Cloud layer thicknesses from a combination of surface and upper-air observations[J]. Climate, 1995, 8(3):550-568.
- [8] Wang Jun hong, Rossow W B. Determination of cloud vertical structure from upper-air observations[J]. J Appl Meteor, 1995, 34:2243-2258.
- [9] Chernykh I V, Eskridge R E. Determination of clouds amount and level from radiosonde soundings[J]. J Appl Meteor, 1996, 35:1362-1369.
- [10] 李伟,邢毅,马舒庆. 国产 GTS1 探空仪与 VAISALA 公司 RS92 探空仪对比分析[J]. 气象, 2009, 35(10):97-102.
- [11] 李伟,李峰,赵志强,等. L 波段气象探测系统建设技术评估报告[M]. 北京:气象出版社,2009.
- [12] 马占山,刘奇俊,秦琰琰. 云探测卫星 CloudSat[J]. 气象, 2008, 34(8):104-111.