

蔡淼, 欧建军, 周毓荃, 等. 2014. L 波段探空判别云区方法的研究 [J]. 大气科学, 38 (2): 213–222, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12193. Cai Miao, Ou Jianjun, Zhou Yuquan, et al. 2014. Discriminating cloud area by using L-band sounding data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 213–222.

L 波段探空判别云区方法的研究

蔡淼^{1,2} 欧建军³ 周毓荃² 杨棋³ 蔡兆鑫⁴

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 上海海洋气象台, 上海 201300

4 山西省人工降雨防雹办公室, 太原 030032

摘 要 利用 2008 年 1 月到 2009 年 12 月的 L 波段探空资料, 和与之时空匹配的 Cloudsat 云观测资料, 首先分析了云内和云外相对湿度的累积频率分布, 发现以 75% 作为相对湿度阈值判断云准确率可达 81%。随后利用 BS (Bias Score) 和 TS (Threat Score) 评分方法, 对不同相对湿度阈值进行评分分析, 发现以 81% 作为相对湿度阈值 TS 评分可达 0.66, 为最高。接着利用 BS 和 TS 评分方法分不同高度对相对湿度阈值进行评分分析, 发现随高度的增加该高度上具有最好 TS 评分的相对湿度阈值在减小。利用这些阈值对云判断时, 总的 TS 评分高于 0.6, 且其准确率达到 84% 以上, 比利用单一相对湿度阈值判断云准确率要高。最后对这些阈值进行优化, 得到一套适合于我国 L 波段探空秒数据的云垂直结构的判别方法。

关键词 L 波段探空 云区 BS 评分 TS 评分

文章编号 1006-9895(2014)02-0213-10

中图分类号 P41

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12193

Discriminating Cloud Area by Using L-Band Sounding Data

CAI Miao^{1,2}, OU Jianjun³, ZHOU Yuquan², YANG Qi³, and CAI Zhaoxin⁴

1 *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

2 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

3 *Shanghai Marine and Meteorological Center, Shanghai 201300*

4 *Weather Modification Office in Shanxi Province, Taiyuan 030032*

Abstract L-band sounding data recorded from January 2008 to December 2009 and responding spatial and temporal Cloudsat data are used to analyze the cumulative frequency distributions of relative humidity in and near clouds. It is determined that the accuracy of cloud discrimination can reach 81% by setting the relative humidity threshold at 75%. In addition, various thresholds of relative humidity for discriminating clouds are evaluated on the bases of bias score (BS) and threat score (TS). By setting the relative humidity at 81%, the highest TS score of 0.66 is achieved. Moreover, relative humidity thresholds at various heights are also analyzed on the bases of BS and TS. The results show that the relative humidity threshold with the highest TS score among thresholds at the same cloud height decreases when the height increases. The TS score of the discriminate cloud area at these thresholds at responding altitudes is higher than 0.6, and the accuracy is more than 84%, which is significantly better result than that obtained by using a single relative humidity

收稿日期 2012-11-06, 2013-09-22 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) 2013CB955802, 公益性行业 (气象) 科研专项经费 GYHY201206025, 国家自然科学基金项目 41275150, 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 2012AA120902

作者简介 蔡淼, 女, 1987 年出生, 博士研究生, 研究方向: 云降水物理与人工影响天气。E-mail: caibird133@163.com

通讯作者 周毓荃, E-mail: zhouyq05@163.com

threshold for all heights. Finally, after optimizing these thresholds, a method of discriminating the cloud vertical structure is proposed by using L-band sounding data.

Keywords L-band sounding, Cloud area, Bias score, Threat score

1 引言

形态各异、尺度不一的云,覆盖着全球 50%以上的天空,对云的研究一直是气象科学研究的重点和难点(邱金桓等, 2003)。对于云的宏观特征,过去以研究云的水平分布和云总量为主,随着探测技术的发展和遥感反演技术的提高,近年来对云的垂直结构的研究成为重点之一。不同的云存在不同的辐射强迫,低云起冷却作用,高云通常起温室效应(Frey et al., 1999)。在研究云对地球辐射收支方面的作用及对气候影响时,云的垂直分布特征对大气环流模式和气候预测模式尤为重要(李积明等, 2009)。Wang and Rossow (1998)通过研究发现云的垂直分布特征对大气循环的作用比水平分布更加重要,并总结出了三个重要的云垂直分布特征参数:云顶高度、云层数以及多层云之间的夹层厚度。

观测云的方法很多,包括地面人工观测、卫星观测、测雨雷达观测、激光雷达观测、激光云幕测量仪观测、云雷达和飞机观测等。但针对云的垂直结构观测而言,这些观测方法都各有优缺点。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;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。对云的观测最有效的是云雷达探测,2006 年 4 月 28 日发射的 CloudSat 卫星搭载 94 GHz 即 3 mm 的云剖面雷达(Cloud Profiling Radar, 简称 CPR),它可直接探测云的垂直结构、云粒子的分布及时空变化,获得以往观测系统无法获得的云特性信息,成为一颗可以对云层特性进行全球测量的卫星(周毓荃和赵殊慧, 2008)。目前,国内外已经有很多利用 Cloudsat 卫星资料进行云垂直结构特征的研究(李积明等, 2009; Mace et al., 2009; 王胜杰等, 2010; 汪会等, 2011; 王帅辉等, 2011; 尚博等, 2012; 彭杰等, 2013)。

探空是气象观测中另一重要的观测手段,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。国外利用探空资料对云垂直结构特征研究较早,Essenwanger and Haggrd (1962)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;Poore (1991)利用地面观测和探空资料探讨了云层的厚度,并用探空的湿度(露点温度差)廓线判定云顶和云底高度(Poore et al., 1995);同年 Wang and Rossow (1995)等改进了 Poore 的方法,提出用相对湿度值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(WR95 法),并将探空和地面观测单层云出现频率做对比;Wang et al. (1999)利用 WR95 法利用 Atlantic Stratocumulus Transition Experiment (ASTEX) 观测计划中的探空资料分析了 Porto Santo Island 地区的云垂直结构特征,并同 8 mm 云雷达、激光云高仪和卫星观测结果进行对比;Chernykh and Eskridge (1996)又提出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(CE96 法);Minnis et al. (2005)利用探空资料,通过对不同的温度值设定不同的相对湿度值阈值判断云层,并且同卫星观测的云顶对比,最后得到判断云层出现概率的经验公式,以此判断云垂直结构(MN05 法)。

近年来,随着我国 L 波段高空气象探测系统的建立与发展,也有一些利用探空资料对云垂直结构特征的研究。张玲等(2009)通过分析相对湿度的突然增加或减小来订正地面人工观测云的准确性。赵仕伟等(2009)将 WR95 探空分析云结构算法利用到数值模式中,以模式输出的数据代替探空数据判定云底高度。周毓荃和欧建军(2010)采用 WR95 法,利用我国探空秒数据,计算分析了不同云垂直结构,将得到的分析结果同 Cloudsat 卫星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垂直结构的可用性。Zhang et al. (2010)改进了 WR95 法,利用 ARM 观测计划在中国寿县的探空资料分析当地的云垂直结构特征,并利用 WACR 雷达和激光云高仪等验证了方法的可靠性。Zhang et al. (2012)根据不同型号探空仪器(CFH、GTS1 和 RS80 型号)的性能,提出并对比了其各自判断云垂直结构的方法。

从云物理学的角度看,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,利用相对湿度的探测值来确定云的垂直结构是可能的。前人对利用探空资料分析云垂直结构的方法已经有相当深入的研究,但国外研究时通常采用 Vaisala 仪器(李伟等, 2009b)探测值,不同的探测仪器具有不同的性能,对湿度探测存在一定的差异,因此有必要利用 Cloudsat 和 L 波段探空匹配的资料系统研究云内外相对湿度的差异,从而形成一套针对于我国 L 波段探空数据的云结构分析方法。本文首先介绍了所用的数据及统计的方法,然后利用气象预报里的 BS 和 TS 评分法,对相对湿度阈值进行评分分析,最后通过对比检验,得出一套 L 波段探空数据的云垂直分布判断方法。

2 资料和方法

本研究将用到我国业务布网的 L 波段探空、Cloudsat 云雷达(波长: 3 mm)及地面观测等资料。首先对涉及的资料进行简单的介绍。

2.1 我国业务布网的 L 波段探空秒数据

我国业务布网的 L 波段高空气象探测系统,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(李伟等, 2009a)。从 2002 年 1 月 1 日我国第一部 L 波段高空气象探测系统在北京观象台正式投入业务开始,到 2011 年我国 120 个探空站都升级为 L 波段高空探测系统。

其中的 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 米升速算, L 波段高空探测仪的空间垂直分辨率为 8 m。与常规的 59—701 高空探测数据相比,具有高分辨率和实时采集的能力,其总体性能优于 59—701 高空气象探测系统,偶然误差减小,数据可靠性提高,其本身的探空高度数据的稳定性和精度也要高于 59—701 高空探测系统。同时中国气象局大气探测中心李伟等(2009b)研究发现: L 波段电子探空仪温度传感器时间常数大;湿度整体系统误差大,高湿测量偏低;并且通过对结果扩展不确定度分析,整体上气压、温度、风速指标较好,而湿度与风向指标较差。Bian et al. (2011)通过对比 GTS1 与 Vaisala RS80 和 CFH 仪器性能发现:国产 GTS1 型探空仪在上对流层甚至于中间对流层存在很大误差。虽然我国 L

波段探空系统性能得到提高,但与 Vaisala 相比还有一定差距,因此非常有必要深入研究 L 波段探空秒数据的云垂直结构分析方法。

2.2 CloudSat 卫星

Cloudsat 卫星是一颗可以对云层特性进行全球测量的卫星,其上搭载的 CPR 云雷达可以从太空“看见”云的内部,可以研究云的内部水平和垂直结构。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。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,实际垂直分辨率可达 240 m(马占山等, 2008; 仲凌志等, 2009)。

Cloudsat 卫星观测轨道过顶我国的时间集中在 01:00(北京时,下同)到 02:00 或 13:00 到 14:00 之间,可用的探空资料仅为 02:00 和 14:00 探测,并且选取探空站点离轨道最小距离小于 50 km 的匹配资料。因此 2008 年到 2009 年两年的资料中一共有 31 个站点(图 1),共 101 份时空匹配的资料进行探空云分析的对比验证。这些探空站点分布在全国各地,因此利用这些站点分析的结果基本能够代表我国平均状况。

2.3 地面人工观测

地面人工观测是云能天观测中最传统的观测手段,主要依靠观测员的经验以及参照物等判断云能天信息,包括:低云、中云、高云状、低云云底高、云量、天气现象等。这些数据可以作为辅助资料,对探空判断的云及 Cloudsat 卫星观测的云进行验证。

2.4 分析方法说明

利用探空数据进行云垂直结构分析,主要利用了探空所得的温湿度参量。因此,温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。目前最为常用的是利用相对湿度阈值法判断云结构,而且以 WR95 法应用最早。周毓荃和欧建军(2010)采用的 WR95 法分析云结构包括以下几个方面:(1)不同温度下相对湿度的合理计算,当气温低于 0℃ 时,考虑到水的冰相是稳态而液相是非稳态,所以要按照冰面饱和水汽压去计算相对湿度;(2)云层中相对湿度最大值大于 87%,

最小值不小于 84%; (3) 相对湿度在云顶有负的跳变, 在云底有正的跳变; (4) 当近地面层相对湿度超过阈值时, 低层云底高度设定为 500 m。Zhang et

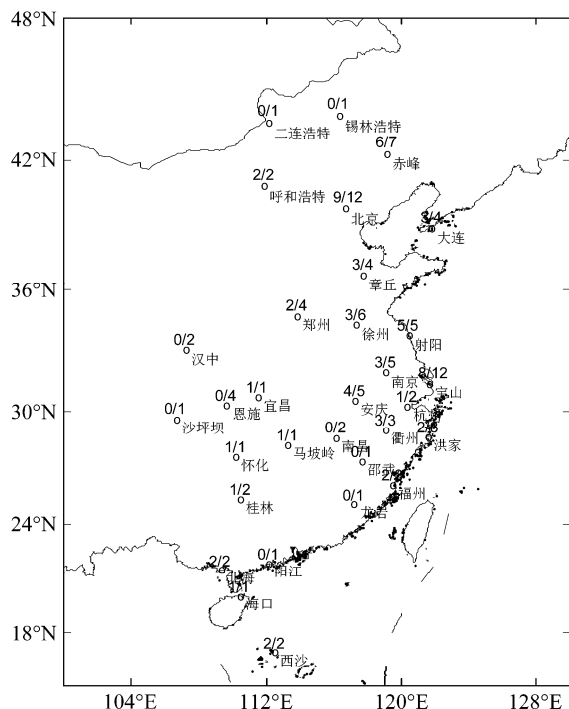


图 1 探空站点分布图 (图中每个探空站上方分数的分母累加表示与 Cloudsat 观测时间和空间匹配的 101 份样本, 分子累加表示最终选取的 65 份样本)

Fig. 1 Distribution of the radio sounding sites (the sum of denominator in the fraction upon each radio sounding site represents the 101 samples which match the Cloudsat satellite observation in both time and space, and sum of numerator represent the final chosen 65 samples)

al. (2010) 利用寿县 Vaisala 探空资料, 通过与云雷达、激光云高仪等观测资料的对比, 改进了 WR95 法, 得到的相对湿度阈值不是固定值而是随高度减小, 同时设定了最大相对湿度阈值和最小相对湿度阈值对夹层和湿层的判断。L 波段探空系统探空仪采用高分子湿敏电阻传感器, 直接测量相对湿度值。而云形成的主要条件也是湿度趋于饱和, 所以直接用相对湿度值作为云判断的阈值, 比较合理。只是由于仪器性能的不同, 阈值的选择成为最为关键问题。由于 Cloudsat 和探空两者有一定的空间距离 (小于 50 km) 及各自性能及其局限性, 在分析时做了以下一些选取和规定: (1) 选取地面观测和 Cloudsat 同时观测到有云或者同时无云的个例, 同时对于有云的情况选取地面观测云量大于 9 成或者 Cloudsat 连续 60 km 观测有云个例, 通过筛选就能保证两者对云观测的一致性, 这样的个例有 65 个 (如图 1 所示), 占总数的 64%; (2) Cloudsat 对近地面至 1.5 km 高度左右的云判断不够准确, 而 L 波段探空在低温情况下对湿度的观测也存在一定的误差, 介于两者各自的缺陷, 选取地面以上 2 km 到 10 km 的数据作为统计资料; (3) 当 Cloudsat 云判别参数 (Mask) 为 40 时设定为云; (4) 当气温低于 0°C 时, 相对湿度按照冰面饱和水汽压计算。

3 相对湿度阈值的确定

3.1 云内、云外相对湿度累积频率分布

图 2 给出了全部个例 (101 个) 云内和云外相

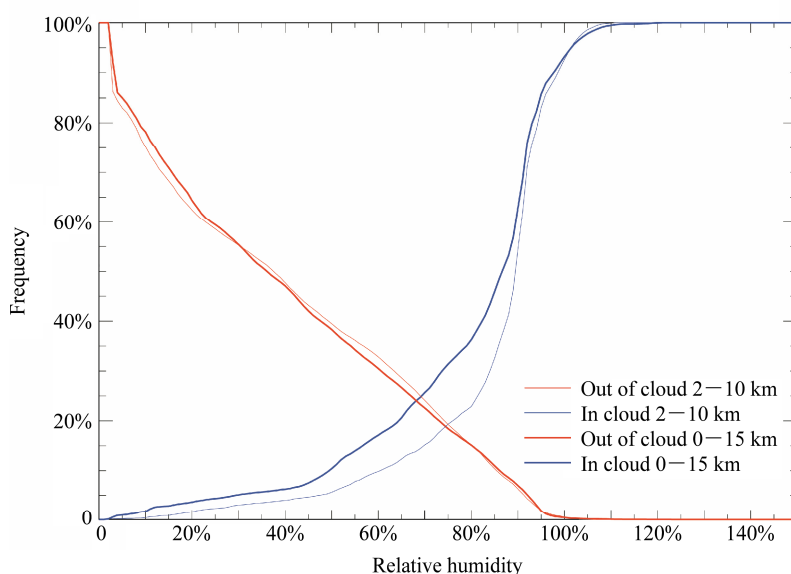


图 2 云内和云外相对湿度累积频率分布图

Fig. 2 Cumulative frequency distribution of relative humidity in and out of cloud

对湿度的累积频率分布,其中红色表示云外,蓝色表示云内,粗线表示 0~15 km 高度数据,细线表示 2~10 km 高度数据。可以看到:对于 0~15 km 的数据,其相对湿度交点在 68%,累积频率交点在 24%,表示如果以相对湿度 68% 作为判断云内云外的标准,则云内大于该阈值和云外小于该阈值的累积频率都是 76%,可以认为对云判断的准确率为 76%。选用 2~10 km 数据作为统计对象时,对云的判断准确率得到明显改善,以 75%作为相对湿度阈值准确率可以到达 81%,可见选取 2~10 km 的数据作为统计对象更有代表性。

表 1 给出了经过地面观测和 Cloudsat 探测匹配的 65 份数据,云内外相对湿度的分布。可以看到:0~15 km 的相对湿度阈值为 67%,准确率为 80%,而 2~10 km 的相对湿度阈值为 73%,准确率为 86.8%。相比于全部的 101 份数据,经过选择的数据对云的判断准确率都得到了提高。同时通过对不同高度层次的云内外相对湿度的累积频率统计发现:相对湿度阈值随高度有降低的趋势,而且准确率都到达了 80%以上。

表 1 不同高度云内外累积频率分布表(65 个选取个例)
Table 1 Cumulative frequency distribution of relative humidity in and out of cloud for different heights (65 selected cases)

高度范围	湿度阈值	累积频率	高度范围	湿度阈值	累积频率
0~15 km	67%	80.0%	5~6 km	76%	92.7%
2~10 km	73%	86.8%	6~7 km	73%	84.9%
2~3 km	79%	89.5%	7~8 km	75%	84.5%
3~4 km	76%	91.8%	8~9 km	73%	84.4%
4~5 km	79%	94.3%	9~10 km	56%	80.5%

3.2 相对湿度阈值的 BS 和 TS 评分测试

从上面分析可以看到,经过筛选的 65 个例 2~10 km 高度的数据更具有代表性和准确性,因此之后分析以此数据为准。同时也可以看到,虽然通过云内外累积频的分布可以得到相对湿度阈值和其判断的准确性,但是并未考虑到空报和漏报的情况。这里采用预报上常用的 BS (Bias Score) 和 TS (Threat Score) 评分,以 Cloudsat 对云的判断作为真值,对不同相对湿度阈值下判断云的情况进行分析,期望得到一个更加客观准确的值。BS 评分和 TS 评分是业务预报中常用的降水量级预报检验的两个统计量,BS 评分的取值范围为 (0, +∞),用于衡量某一量级的预报偏差,其值大于 1 表示空报率高于漏报率,小于 1 时表示漏报率高于空报率;

TS 评分是衡量某一量级的预报准确率的标准,取值范围为 0~1,对某一量级的预报无预报技巧时值为 0,对某一量级降水预报准确率达 100%时值为 1,即无空报和漏报。

根据表 2, BS 和 TS 评分的定义如下:

$$BS = (X + Y)/(X + Z),$$
$$TS = X/(X + Y + Z),$$
$$\text{正确率} = X/(X + Y),$$
$$\text{漏报率} = Y/(X + Y),$$
$$\text{空报率} = Z/(X + Y).$$

(1)(2)(3)(4)(5)

表 2 双态分类联列表(X、Y、Z 和 W 分别正确预报、漏报、空报和正确否定的次数)

Table 2 Two-state classification linked list (X, Y, Z, W stands for the number of correct prediction, missing prediction, empty prediction and correct negative respectively)

	预报出现	预报不出现	观测相加
观测出现	X (正确)	Y (漏报)	X+Y
观测不出现	Z (空报)	W (正确否定)	Z+W
预报相加	X+Z	Y+W	

表 3 给出了相对湿度阈值从 70%到 90%时预报准确次数,空报次数,漏报次数及 BS 和 TS 评分。从表中可以看到:随着相对湿度阈值的增加,对云区判断的正确率和空报率都在减小,因此从 TS 评分看当相对湿度阈值为 81%时,TS 值达到最大,说明此时以 81%作为阈值判断云效果最好。此时 BS 评分接近 1.0,空报率略大于漏报率。

如果不考虑高度,判断 2~10 km 高度的云时以 81%的相对湿度作为阈值效果最好,从前面不同高度云内和云外的相对湿度累积频率分布看到,不同高度具有不同的相对湿度阈值,因此按照每 1 km 高度间隔对不同高度云判别作 BS 和 TS 评分,并选取评分效果最好的相对湿度阈值,结果列于表 4。可以看到:在 2~10 km 高度范围内,不同高度相对湿度阈值判别云区的 TS 评分都在 0.6 以上。除 9~10 km 以外,BS 评分均小于 1,即空报略多于漏报,准确率都在 80%以上。随着高度的增加,相对湿度阈值有减小的趋势;当不同高度按照不同相对湿度阈值判断云时,其正确率比以单一相对湿度阈值正确率要高,同时 TS 评分也要优于单一相对湿度阈值的评判。虽然 1~2 km 与 10~15 km 高度范围内得到的阈值可靠性不如 2~10 km 高度范围,

表 3 不同相对湿度阈值对云区判别的 BS 和 TS 评分

Table 3 BS and TS of cloud discrimination by different Relative Humidity (RH) thresholds

相对湿度	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>W</i>	正确率	漏报率	空报率	BS 评分	TS 评分
70%	12056	1423	6002	32519	89.44%	10.56%	44.53%	0.746	0.619
71%	11966	1513	5683	32838	88.78%	11.22%	42.16%	0.764	0.624
72%	11896	1583	5334	33187	88.26%	11.74%	39.57%	0.782	0.632
73%	11804	1675	4995	33526	87.57%	12.43%	37.06%	0.802	0.639
74%	11670	1809	4667	33854	86.58%	13.42%	34.62%	0.825	0.643
75%	11553	1926	4346	34175	85.71%	14.29%	32.24%	0.848	0.648
76%	11433	2046	4062	34459	84.82%	15.18%	30.14%	0.87	0.652
77%	11341	2138	3859	34662	84.14%	15.86%	28.63%	0.887	0.654
78%	11236	2243	3657	34864	83.36%	16.64%	27.13%	0.905	0.656
79%	11138	2341	3483	35038	82.63%	17.37%	25.84%	0.922	0.657
80%	11051	2428	3312	35209	81.99%	18.01%	24.57%	0.938	0.658
81%	10958	2521	3123	35398	81.3%	18.7%	23.17%	0.957	0.66
82%	10754	2725	2930	35591	79.78%	20.22%	21.74%	0.985	0.655
83%	10523	2956	2686	35835	78.07%	21.93%	19.93%	1.02	0.651
84%	10305	3174	2442	36079	76.45%	23.55%	18.12%	1.057	0.647
85%	9978	3501	2217	36304	74.03%	25.97%	16.45%	1.105	0.636
86%	9622	3857	2041	36480	71.39%	28.61%	15.14%	1.156	0.62
87%	9233	4246	1849	36672	68.5%	31.5%	13.72%	1.216	0.602
88%	8863	4616	1706	36815	65.75%	34.25%	12.66%	1.275	0.584
89%	8473	5006	1572	36949	62.86%	37.14%	11.66%	1.342	0.563
90%	7758	5721	1395	37126	57.56%	42.44%	10.35%	1.473	0.522

表 4 不同高度相对湿度阈值及其 BS 和 TS 评分

Table 4 Thresholds of relative humidity and their BS and TS at different heights

高度/km	相对湿度	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>W</i>	正确率	漏报率	空报率	BS 评分	TS 评分
2~3	85%	979	216	222	5083	81.92%	18.08%	18.58%	0.995	0.691
3~4	81%	1170	133	266	4931	89.79%	10.21%	20.41%	0.907	0.746
4~5	82%	1248	96	244	4912	92.86%	7.14%	18.15%	0.901	0.786
5~6	80%	1485	143	272	4600	91.22%	8.78%	16.71%	0.927	0.782
6~7	79%	1481	327	515	4177	81.91%	18.09%	28.48%	0.906	0.638
7~8	78%	1668	331	615	3886	83.44%	16.56%	30.77%	0.876	0.638
8~9	73%	1562	265	734	3939	85.5%	14.5%	40.18%	0.796	0.61
9~10	70%	1775	600	397	3728	74.74%	25.26%	16.72%	1.093	0.64
全部		11368	2111	3265	35256	83.54%	15.67%	24.22%	0.92	0.675
2~10	81%	11368	2111	3265	35256	81.25%	18.75%	23.16%	0.958	0.66
1~2	91%	515	4316	422	547	54.96%	45.04%	58.38%	0.882	0.347
10~15	68%	1907	22650	2112	2331	47.45%	52.55%	58.0%	0.948	0.3

但是这里依然给出了 TS 评分最好的相对湿度阈值。由于 0~1 km 高度 Cloudsat 卫星判断出现云的次数很少, 所以这里不作统计, 在应用时可以参考 1~2 km 的阈值。

3.3 相对湿度阈值的优化

相对湿度阈值从 2~10 km 有随高度增加而降低的趋势, 但是在 2~8 km 范围降低比较缓慢, 而 8~10 km 降低很明显, 为保持相对湿度阈值随高度变化的连续性, 可以以 8 km 为界将其分为两段按

照高度线性拟合, 最终得到一个线性的阈值线。通过拟合得到的相对湿度阈值线为:

$$H_r = \begin{cases} -1.223 \times H + 87, & (2 \leq H < 7.562) \\ -4.0 \times H + 108, & (7.562 \leq H \leq 10) \end{cases} \quad (6)$$

式中 H 为高度, 单位为 km, H_r 为相对湿度。并且拟合时复相关系数 R^2 分别为 0.8567 和 0.9796。按照连续的相对湿度阈值判断云, 其准确率为 83.71%, TS 评分为 0.675, 与每千米取不同阈值相比, 准确率和 TS 评分略有减小, 但相差不大。

由于 L 波段探空和 Cloudsat 对高层 (10 km 以上) 和低层 (2 km 以下) 探测的缺陷, 其相对湿度阈值的准确率和 TS 评分并不高。为了得到整层云的相对湿度阈值, 依然可以通过分段设定。通过拟合得到相对湿度阈值线为:

$$H_r = \begin{cases} 91, & (0 \leq H < 1) \\ -6.416 \times H + 97, & (1 \leq H < 2) \\ -1.223 \times H + 87, & (2 \leq H < 7.562) \\ -4.0 \times H + 108, & (7.562 \leq H \leq 10) \\ 68, & (10 < H) \end{cases} \quad (7)$$

可以看到当高度低于 1 km 时相对湿度阈值为 91%, 与邱珩 (2010) 利用 2009 年 4 月张家口 Vaisala RS92 型号探空与 K/LLX502B 型激光测云雷达对比得出的以相对湿度 90%~95% 作为入云判断一致。

在观测中用阈值法判别云层时, 有时发现很厚的无云夹层或云层, 其可信度较差。参考 Zhang et al. (2010) 的方法, 设定最大和最小阈值, 分别是阈值加 3 和减 5, 如果夹层厚度小于 300 m, 相对湿度大于最小阈值则判别为云区; 如果云层厚度小于 80 m, 而湿度小于最大阈值, 则判别为无云湿层。选取湿层 80 m 和夹层 300 m 以及最大和最小相对湿度阈值是经过各种组合测试得到的最优结果。按照优化的方法计算的准确率为 83.54%, TS 评分为 0.675, 与优化前变化不大。但优化前判断云时, 容易出现多层云 (最多有 11 层), 而优化后云层数量减小, 更接近于 Cloudsat 卫星观测的情况。

3.4 优化后方法与 WR95 法的对比

图 3 为赤峰站 2008 年 7 月 5 日 14:00 探空相对湿度和时空匹配的 Cloudsat 卫星 Mask 对比图, 图中分别给出了 WR95 法 (周毓荃和欧建军, 2010) 的相对湿度阈值线 1 (以相对湿度 84% 作为判断云的阈值) 和本文相对湿度阈值线 2。

可以看到以相对湿度 84% 为云阈值线时, 云顶高度为 9.45 km, 这与按照 Cloudsat 云卫星 Mask 所示云顶高度 12.49 km 存在很大的差距。此时根据新相对湿度阈值线的判断, 云顶高度为 12.53 km, 与 Cloudsat 卫星观测的结果更为接近, 说明改进后的阈值方法判断云垂直结构更准确。同时可以看到, 利用探空数据按照相对湿度阈值判断 11.5 km 高度上存在一个夹层, 这个与 Cloudsat 卫星观测结果不一致, 所以通过设定最小夹层厚度和最小相对湿度阈值的办法去除多余的夹层有一定的意义。同时,

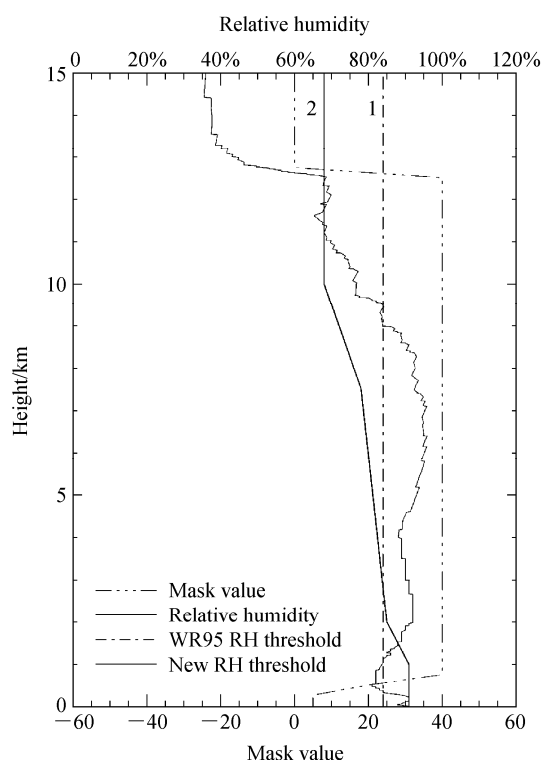


图 3 2008 年 7 月 5 日 14:00 (北京时, 下同) 赤峰站探空与 Cloudsat 卫星观测对比

Fig. 3 The comparison of radio sounding with Cloudsat satellite observation at ChiFeng station at 1400 BJT (Beijing Time) on 5 July 2008

从表 3、4 可以看到利用 WR95 法 (周毓荃和欧建军, 2010) 判断云区时采用相对湿度阈值为 84%, 其判断云的准确率为 76.45%, TS 评分为 0.647; 优化后方法的准确率为 83.54%; TS 评分为 0.675, 均优于前者。

3.5 相对湿度与云出现机率的关系

为了进一步研究云的出现和相对湿度的关系, 某一相对湿度值条件下, 出现云的次数与总次数的比值称为云出现机率。图 4 给出了以 65 个时空匹配的个例 2~10 km 高度数据为样本, 统计得到的云内相对湿度频率分布和不同相对湿度下云出现机率分布图。从云物理学讲, 暖云中相对湿度应接近 100% (差别一般小于 1%), 在冷云中, 水面相对湿度一般应小于 100%; 而冰面相对湿度可大于 100%, 在 -10°C 时应是 100%~110%, -20°C 时为 100%~120%。由于探空测湿原件的误差, 云雾中往往达不到上述理论值, 从图 4 可以看到, L 波段探空仪所测云中相对湿度主要分布在 79%~105% 范围段内, 占了总数的 81%, 其中相对湿度值 89%~96% 比较集中, 占总数的 47%; 最大频数出现在 92% 处, 这说明云中探空相对湿度观测的误差

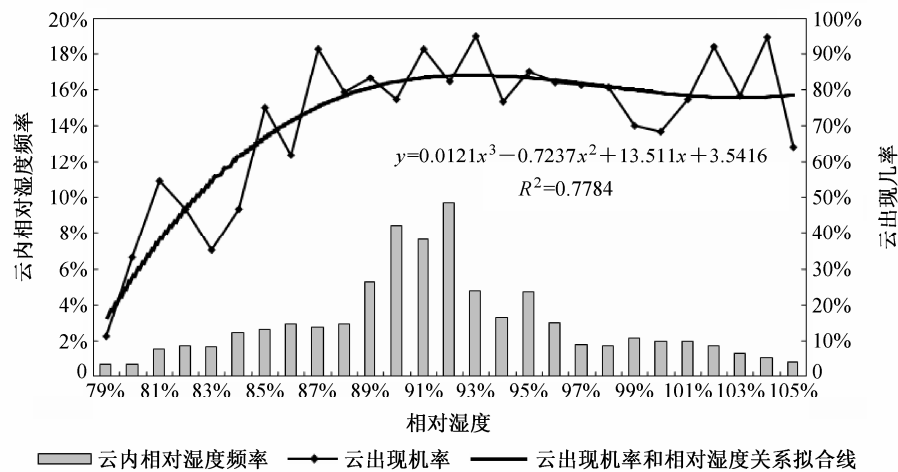


图 4 云内相对湿度频率分布和不同相对湿度下云出现机率分布
Fig. 4 The frequency distribution of relative humidity in cloud and cloud existing frequency distribution under different relative humilities

是比较大的，不得不用阈值法来判断。

从图 4 可以看到，不同相对湿度条件下云出现机率各不相同，总的来说随着相对湿度的增加，云出现机率也是在增加，当相对湿度从 79% 增加到 87% 时，云出现机率从 11% 增大到 80%~90%。相对湿度大于 87% 时云出现机率基本维持在 80%~90%。对云出现机率随相对湿度行三阶多项式的拟合可以看到，云出现机率随相对湿度的加大而增加，随后当相对湿度达到 90% 以上时云出现机率维持在 80%，并且两者相关系数的平方为 0.7784。

3.6 不同温度下的云阈值

本文计算相对湿度时，在温度低于 0℃ 以下时采用冰面饱和水汽压，云中最大理论值随温度降低而增大，因此有必要分析不同温度下的判别阈值。从表 5 可以看到：随着温度的降低阈值也在减小，同时对云的判断准确率也在降低。说明如果全部采用水面饱和水汽压计算相对湿度，则阈值随温度降低将减小得更为明显。温度低时对云的判断准确率降低，这也说明在低温条件下相对湿度探测的准确性更需要提高。

表 5 不同温度下云内外相对湿度累积频率分布表
Table 5 Cumulative frequency distribution of relative humidity in and out of cloud at different temperature

温度/℃	湿度阈值	累积频率
<-20	57%	82.2%
-20~-10	75%	84.4%
-10~0	77%	91.0%
>0	78%	91.6%
全部	73%	86.8%

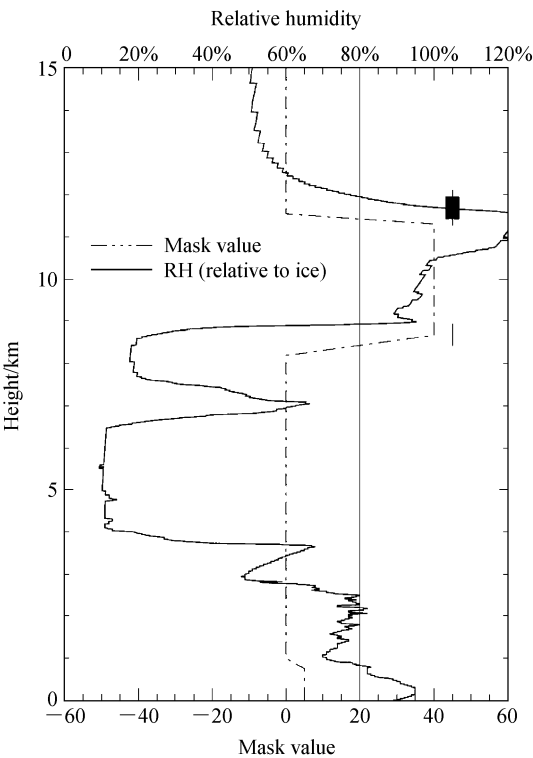


图 5 2008 年 6 月 10 日 02:00 徐州站探空与 Cloudsat 卫星对比图
Fig. 5 The radiosonde comparison with Cloudsat satellite observation at 02:00 (BJT) 20 June 2008 in Xuzhou

3.7 探空滞后性

通过 L 波段相对湿度探测值与 Cloudsat 卫星观测云结构对比，发现 L 波段探空在相对湿度的探测上具有一定的滞后性。图 5 给出了 2008 年 6 月 10 日 02:00 徐州探空相对湿度与 Cloudsat 的 Mask 值对比图，图中粗实线为相对湿度（温度低于 0℃ 时换算为相对冰面湿度），虚线为 Cloudsat 的 Mask 值

(等于 40 时视为云), 细实线表示相对湿度等于 80% 的阈值线。此时地面观测天气现象为轻雾(近地面相对湿度大于 90%), 有中云且云量为 10, 全天布满云, 说明 Cloudsat 和探空对云的探测趋于一致。可以看到: 在入云和出云时探空都存在一定的滞后, 此时温度分别为 -27.9°C 和 -48.9°C 。对所有个例进行分析发现, 有 18 个个例存在滞后现象, 并且出现滞后时温度均低于 0°C 。滞后现象的存在也是利用探空相对湿度阈值判断云时会出现漏判和误判的原因之一。

4 结论与讨论

利用 2008 年 1 月到 2009 年 12 月的 L 波段探空资料, 与时空匹配的 Cloudsat 云观测资料, 分析了云内外相对湿度的累积频率分布, 并通过对设定的阈值进行 BS 和 TS 评分测试, 得到了一些有意义的结果。

(1) 利用 L 波段探空资料, 通过相对湿度阈值法, 可以判断云区位置。统计分析得出最佳阈值随高度的增加而减小, 利用该阈值对云判断时, 准确率在 80% 以上, TS 评分也高于 0.6。

(2) 相对湿度阈值和判断云区的准确率随高度的增大和温度降低趋于减小, 估计和低温情况下仪器对湿度探测存在误差有关。

(3) 利用探空和 Cloudsat 探测资料的匹配对比来判断云区的存在是可行的。但两者在时间和空间上的差别, 可能会引起一定误差。对于低云的探测, Cloudsat 存在局限。

(4) 探空对湿度的探测具有一定滞后性, 有时会影响云层高度的判断。

参考文献 (References)

- Bian Jianchun, Chen Hongbin, Vömel H, et al. 2011. Intercomparison of humidity and temperature sensors: GTS1, Vaisala RS80, and CFH [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28 (1): 139–146.
- Chernykh I V, Eskridge R E. 1996. Determination of cloud amount and level from radiosonde soundings [J]. *J. Appl. Meteor.*, 35 (8): 1362–1369.
- Essenwanger O, Haggard G H. 1962. Frequency of clouds in height layers for Berlin (Tempelhof) [J]. *J. Appl. Meteor.*, 1 (4): 560–569.
- Frey R A, Baum B A, Menzel W P, et al. 1999. A comparison of cloud top heights computed from airborne lidar and MAS radiance data using CO_2 slicing [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D20): 24547–24555.
- 李积明, 黄建平, 衣育红, 等. 2009. 利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征 [J]. *大气科学*, 33 (4): 698–707. Li Jiming, Huang Jianping, Yi Yuhong, et al. 2009. Analysis of vertical distribution of cloud in East Asia by space-based lidar data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (4): 698–707.
- 李伟, 李峰, 赵志强, 等. 2009a. 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. Li Wei, Li Feng, Zhao Zhiqiang, et al. 2009. L-Band Meteorological Observation System Construction Technology Assessment Report (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 李伟, 邢毅, 马舒庆. 2009b. 国产 GTS1 探空仪与 VAISALA 公司 RS92 探空仪对比分析 [J]. *气象*, 35 (10): 97–102. Li Wei, Xing Yi, Ma Shuqing. 2009. The analysis and comparison between GTS1 radiosonde made in China and RS92 radiosonde of Vaisala company [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 35 (10): 97–102.
- 马占山, 刘奇俊, 秦琰琰, 等. 2008. 云探测卫星 CloudSat [J]. *气象*, 34 (8): 104–111. Ma Zhanshan, Liu Qijun, Qin Yanyan. 2008. Introductions to a new type cloud detecting satellite—CloudSat [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34 (8): 104–111.
- Mace G G, Zhang Q Q, Vaughan M. 2009. A description of hydrometeor layer occurrence statistics derived from the first year of merged Cloudsat and CALIPSO data [J]. *J. Geophys. Res.*, 114 (D8): D00A26.
- Minnis P, Yi Y H, Huang J P, et al. 2005. Relationships between radiosonde and RUC-2 meteorological conditions and cloud occurrence determined from ARM data [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D2): D23204.
- 彭杰, 张华, 沈新勇. 2013. 东亚地区云垂直结构的 CloudSat 卫星观测研究 [J]. *大气科学*, 37 (1): 91–100. Peng Jie, Zhang Hua, Shen Xinyong. 2013. Analysis of vertical structure of clouds in East Asia with CloudSat data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 37 (1): 91–100.
- Poore K D. 1991. Cloud Base, Top and Thickness Climatology from RAOB and Surface Data [C]. California: Cloud Impacts on DOD Operations and Systems 1991 Conference.
- Poore K D, Wang J H, Rossow W B. 1995. Cloud layer thicknesses from a combination of surface and upper-air observations [J]. *J. Climate*, 8 (3): 550–568.
- 丘珩. 2010. GPS 加密探空资料在 2009 年春季张家口地区云降水分析中的应用研究 [D]. 北京大学硕士学位论文. Qiu Heng. 2010. Applications of GPS Radiosondes for Cloud Precipitation Analysis in Zhangjiakou During the Spring of 2009 [D]. Master thesis (in Chinese), Peking University.
- 邱金桓, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 2003. 现代大气物理学研究进展 [J]. *大气科学*, 27 (4): 628–652. Qiu Jinhuan, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. 2003. Modern research progresses in atmospheric physics [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (4): 628–652.
- 尚博, 周毓荃, 刘建朝, 等. 2012. 基于 Cloudsat 的降水云和非降水云垂直特征 [J]. *应用气象学报*, 23 (1): 1–9. Shang Bo, Zhou Yuquan, Liu Jianchao, et al. 2012. Comparing vertical structure of precipitation cloud and non precipitation cloud using Cloudsat [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 23 (1): 1–9.
- 汪会, 罗亚丽, 张人禾. 2011. 用 CloudSat/CALIPSO 资料分析亚洲季风区和青藏高原地区云的季节变化特征 [J]. *大气科学*, 35 (6): 1117–1131. Wang Hui, Luo Yali, Zhang Renhe. 2011. Analyzing seasonal variation of clouds over the Asian monsoon regions and the Tibetan Plateau region using CloudSat/CALIPSO data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (6): 1117–1131.

- Wang J H, Rossow W B. 1995. Determination of cloud vertical structure from upper-air observations [J]. *J. Appl. Meteor.*, 34 (10): 2243–2258.
- Wang J H, Rossow W B. 1998. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM [J]. *J. Climate*, 11 (11): 3010–3029.
- Wang J H, Rossow W B, Uttal T, et al. 1999. Variability of cloud vertical structure during ASTEX from a combination of rawinsonde, radar, ceilometer, and satellite data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 127 (10): 2484–2502.
- 王胜杰, 何文英, 陈洪滨, 等. 2010. 利用 Cloudsat 资料分析青藏高原、高原南坡及南亚季风区云高度的统计特征量 [J]. *高原气象*, 29 (1): 1–9. Wang Shengjie, He Wenying, Chen Hongbin, et al. 2010. Statistics of cloud height over the Tibetan Plateau and its surrounding region derived from the CloudSat data [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29 (1): 1–9.
- 王帅辉, 韩志刚, 姚志刚, 等. 2011. 基于 CloudSat 资料的中国及周边地区云垂直结构统计分析 [J]. *高原气象*, 30 (1): 38–52. Wang Shuaihui, Han Zhigang, Yao Zhigang, et al. 2011. Analysis on cloud vertical structure over China and its neighborhood based on CloudSat data [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30 (1): 38–52.
- Zhang J Q, Chen H B, Li Z Q, et al. 2010. Analysis of cloud layer structure in Shouxian, China using RS92 radiosonde aided by 95 GHz cloud radar [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D7): D00K30.
- Zhang J Q, Chen H B, Bian J C, et al. 2012. Development of cloud detection methods using CFH, GTS1, and RS80 radiosondes [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29(2): 236–248.
- 张玲, 张小平, 葛凡. 2009. 借用探空数据校对云高的分析 [J]. *科技资讯*, (1): 42–43. Zhang Lin, Zhang Xiaoping, Ge Fan. 2009. The analysis of using radiosonde data to proofread cloud height [J]. *Science & Technology Information (in Chinese)*, (1): 42–43.
- 赵仕伟, 赵增亮, 史荟燕, 等. 2009. WR95 探空分析算法在中尺度数值模式中的应用研究 [C]// 第 26 届中国气象学会年会人工影响天气与大气物理学分会场论文集. 北京: 中国气象学会. Zhao Shiwei, Zhao Zengliang, Shi Huiyan. 2009. A study on the application of WR95 rawinsonde observations in a mesoscale numerical model [C]// (in Chinese). Beijing: Chinese Meteorological Society.
- 仲凌志, 刘黎平, 葛润生. 2009. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望 [J]. *地球科学进展*, 24 (4): 383–390. Zhong Lingzhi, Liu Liping, Ge Runsheng. 2009. Characteristics about the millimeter-wavelength radar and its status and prospect in and abroad [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 24 (4): 383–390.
- 周毓荃, 欧建军. 2010. 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*, 36 (11): 50–58. Zhou Yuquan, Ou Jianjun. 2010. The method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36 (11): 50–58.
- 周毓荃, 赵殊慧. 2008. 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*, 31 (5): 603–614. Zhou Yuquan, Zhao Shuhui. 2008. CloudSat satellite and its application in weather and cloud observation [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 31 (5): 603–614.