

引用格式: Zhang Riwei, Yan Wei, Han Ding, *et al.* Determination of Cloud Vertical Structure and Analysis of Its Distribution based on RS92 Radiosonde Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(2): 231-236.
[张日伟, 严卫, 韩丁, 等. 基于 RS92 探空资料的云垂直结构判定及其分布研究[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(2): 231-236.]

基于 RS92 探空资料的云垂直结构 判定及其分布研究

张日伟¹, 严 卫¹, 韩 丁¹, 杨树臣^{1,2}

(1. 解放军理工大学气象学院, 江苏 南京 211101; 2. 91876 部队, 河北 秦皇岛 066203)

摘要: 基于已有的云垂直结构判断方法, 结合高垂直分辨探空资料, 对相对湿度阈值法进行相应改进, 并利用德比尔特地区 2007 年全年的 RS92 探空资料, 对该地区的云垂直结构进行判定, 同时对该地区云出现频率及云垂直结构参数的分布特征进行统计分析。结果表明: 利用改进相对湿度阈值法来分析高分辨探空资料的云垂直结构是可行的; 该地区的云层, 以单层云和双层云为主, 且单层云出现频率呈“冬高夏低”分布, 双层云则与其相反; 其所有云平均云底高、云顶高、云厚度、顶层云顶高的出现频率, 随高度的增加而减小。

关 键 词: RS92 探空仪; 相对湿度; 云垂直结构

中图分类号: P 407; TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2012)02-0231-06

1 引 言

云是大气中水汽凝结(凝华)成的水滴、冰晶或它们混合组成的漂浮在空中的可见聚合体。形态各异、尺度不一的云, 覆盖着全球 50% 以上的天空, 在全球能量循环和水分循环中具有重要的作用。云与辐射的相互作用, 对天气变化过程有重要的影响, 云的分布状况从气候上说是一个不可忽视的重要因素^[1-2]。同时, 云也是人工影响天气催化作业的主要对象, 是影响现代武器装备能否发挥效用的重要因素。因此, 云的特征特别是垂直结构特征已成为天气和气候研究的重要内容。

云的垂直结构特征主要包括云底和云顶高度、云层厚度、云层数以及云层之间的晴空厚度等。目前, 关于云垂直结构的观测手段非常有限, 主要靠地面人工观测及利用气球、云幕灯、激光云幕仪来获取低层云云底信息, 一般的星载雷达只能获取云顶信息, 对低云的探测能力较弱。A-Train 卫星编队中,

CloudSat 卫星搭载的云廓线雷达(CPR)和 CALIPSO 卫星搭载的云—气溶胶垂直偏振激光雷达(CALIOP), 虽为全面获取云顶、云底和云内部结构的信息提供了可能, 但是其周期长, 对同一地区的观测也有限。

无线电探空系统是现今应用最广泛, 可提供 35 km 高度以下各层温、压、湿、风等气象要素随高度变化信息的业务探测系统, 凭借长时间的历史数据及大范围的覆盖在气候研究中受到足够的重视。1995 年 Poore 等^[3]联合北半球 14 a 的探空数据和 63 个测站的地面观测数据, 用露点温度差廓线判定云顶和云底高度, 并实现了云层厚度的探测; 同年, Wang 等^[4]对低分辨率的探空资料, 提出了利用相对湿度的阈值以及云顶和云底相对湿度负和正 3% 的跳变来判断云层; 1996 年 Chernykh 等^[5]提出了利用温度垂直廓线和相对湿度二阶导数随高度的变化判断云底和云顶的新方法; 2000 年 Wang 等^[6]利

收稿日期: 2011-07-15; 修订日期: 2011-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41076118)资助。

作者简介: 张日伟(1986—), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事大气遥感方面研究。E-mail: zhangriwei86@126.com。

通讯作者: 严 卫(1961—), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 主要从事大气、海洋遥感方面的研究。E-mail: weiyan2002net@yahoo.com.cn。

用相对湿度阈值法分析了 20 a 的探空资料云的垂直结构,并建立了一个关于全球云垂直结构的气候资料库;2010 年周毓荃等^[7]对比分析了已有探空分析云垂直结构的方法,并将相对湿度阈值法作为云垂直结构分析的方法;2010 年张金强等^[8]利用 RS92 探空仪和 95 GHz 的云雷达分析了寿县上空云的垂直结构。

本文针对高垂直分辨率的 RS92 探空资料,综合 Wang 等^[4]、张金强等^[8]判断云垂直结构的理论,对已有的相对湿度阈值判定云垂直结构的方法进行改进,并对德比尔特地区云的垂直结构进行了判定,同时分析了该地区的云垂直结构分布特征。

2 RS92 探空资料

本文使用 2007 年 1~12 月在荷兰德比尔特(De Bilt)(纬度:52.1007°N,经度:5.1774°E,海拔高度:5 m)的常规探空资料,其在 Google 卫星地图中的位置如图 1 所示。该常规探空资料,使用 Vaisala 公司生产的 RS92 型探空仪,测量温、压、湿等的垂直分布,每天释放 2 次(00、12UTC),由于资料获取手段有限,我们只得到了 12UTC 的资料。从 2007 年 1 月 1 日至 12 月 31 日,共有 310 次有效探空资料,其中有 95.8% 的探测高度大于 20 km。RS92 型探空仪为全数字调频式探空仪,每 2 s(10 m)采集和发送一组温度、气压和湿度数据,垂直分辨率高;探空仪内有两个温度传感器,分别测量气温和舱内温度,便于调整温度系数;气压测量上使用新型快速响应气压传感器;使用了两个湿度传感器,可以在探空仪出云和入云时,通过交替加热的方式防止传感器表面凝结露或霜;先进的地面定标设备,可以模拟整个探空仪在高空中的实际环境。

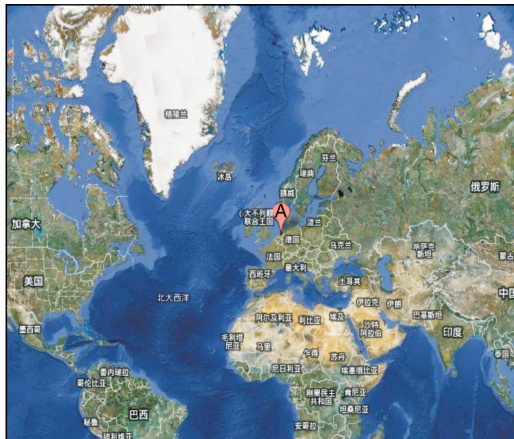


图 1 Google 卫星地图中 De Bilt 的位置(图中 A 点)

Fig. 1 The location(point A) of De Bilt in Google satellite map

RS92 型探空仪上述措施保证了温度、气压和湿度等气象参数的高精度测量,其中温度分辨率 0.1 °C,测量精度为 0.2 °C;相对湿度测量分辨率 1%,测量精度为 2%,测量不确定性小于 5%^[9-10]。国内李伟等^[10]对国产 GTS1 探空仪与 RS92 探空仪的综合性能进行了对比,后者的温度滞后误差小;邢毅等^[11]采用同球施放法对 RS92 探空仪进行了性能试验与分析,其性能良好。2010 年 WMO 组织对多种探空仪的对比验证实验结果表明,RS92 型探空仪是当前国际上应用广泛、气象要素测量精度最高的一种探空仪^[12]。

3 云垂直结构的判定

云形成的主要条件之一是空气中水汽达到饱和,因此探空资料云垂直结构的判定主要是利用了其相对湿度参量。目前,云垂直结构的判定主要有 3 种方法:温度露点差阈值法^[3]、相对湿度阈值法^[4]和温度和相对湿度廓线随高度变化的二阶导数法^[5]。周毓荃等^[7]对这 3 种方法作了比较,并认为直接用相对湿度值作为云判断的阈值,比较合理。但是 Wang 等^[4]提出的相对湿度阈值法中,其相对湿度在云底和云顶跳变 3% 的条件,对低垂直分辨率的探空数据,是很容易满足的;张金强等^[8]分析认为,对高垂直分辨率(2 s)的 RS92 探空仪,这个条件是很难实现的。

因此,本文针对高垂直分辨率的 RS92 探空资料,综合 Wang 等^[4]、张金强等^[8]相对湿度阈值判断法,分别对云底高和云顶高进行判定。

3.1 云底高的判定(从廓线低端开始向上一直延伸至廓线顶端)

(1)第 1 层云云底高的判定:无论该湿度层为近地面层还是非近地面层,其相对湿度 $RH \geq 84\%$,该湿度层所在高度即可作为第 1 层云云底高。

(2)第 2 层及以上各层云云底高的判定:湿度层的相对湿度 $RH \geq 84\%$,该湿度层所在高度即可作为该层云云底高。

3.2 云顶高的判定

从廓线顶端开始并延伸至廓线底部,若某湿度层的相对湿度 $RH \geq 84\%$,该湿度层所在高度即可作为云顶高。

另外,当仅检测到云底高而未得到云顶高信息(云顶高度大于廓线顶端高度的情形除外),或云层的最大相对湿度 $RH_{\max} < 87\%$,该湿度层不能判定为云层。由于德比尔特位于中高纬度地区,根据对

该地区云的长期观测,并借鉴 Wang 等^[4]的方法,我们设置一个 500 m(AGL)的云底高阈值,当某层云云顶高低于该阈值,该云层作舍弃处理,若某层云云顶高度大于该阈值,而云底高度低于该阈值,其云底高从 500 m 算起。

另外, Wang 等^[13]通过 13 次大气环流模式试验研究,总结出 3 个重要的云垂直结构参数:最上层云顶高度、云的层数以及多层云中相邻两层云之间的晴空厚度,并且发现云分布的垂直梯度对大气循环的作用比水平梯度更重要。李积明等^[14]利用 CALIPSO 激光雷达数据对东亚地区云垂直分布随季节变化及云垂直结构参数随高度的变化进行了统计分析;王帅辉等^[15]利用 CloudSat/CALIPSO 资料对中国及周边地区云垂直结构进行了统计分析;韩丁等^[16]利用 COSMIC 掩星探测资料研究了中国及周边地区云层垂直结构参数的分布特征。因此,在反演云垂直结构参数同时对其进行统计特征研究也显得尤为重要。利用云顶和云底高度差可以得到云层的厚度信息,对于相邻两层云,借助上层云的云底高度和下层的云顶高度之差可以获取云层间的晴空厚度信息,据此得到云顶和云底高度、云层厚度、云层数以及多层云各相邻层之间的晴空厚度等云的垂直结构信息,进而对该地区的云垂直结构特征进行统计研究。

4 云垂直结构分析及其统计特征

4.1 云垂直结构分析

Wang 等^[4]提出的利用相对湿度法判断云层垂直结构方法,与以往传统方法相比较的过程中,在云垂直结构分析方面显示出了巨大的优越性。下面给出了 4 个利用相对湿度法进行云垂直结构判断的个例。

图 2 为德比尔特站 2007 年 1 月 2 日的探空云垂直结构分析图,从图中可以看出相应时刻,在 1~2 km 高度上,有单层云存在,且为低云,此外在 0~0.5 km 之间,其相对湿度大于 87%,但其低于我们设置的相对阈值,该层云云底高从 0.5 km 算起;图 3 为该站 2007 年 1 月 10 日的探空云分析图,从图上可以看出,有双层云存在,且下层为低云,上层为中云,另外在 5~6 km 之间,有一湿度层,但因其最大相对湿度小于 87%,根据判定标准,作舍弃处理;图 4 为该站 2007 年 6 月 21 日的探空云分析图,可以看出其在相应时刻,有 3 层云存在,且下层为低云,中上层为中云;图 5 为该站 2007 年 1 月 3

日的探空云分析图,从图中可以看出有 5 层云存在,并且能够检测出第 1 层和第 3 层云之间的小夹层(作为第 2 层云)。

以上 4 个个例的分析表明,利用改进的相对湿度法对高垂直分辨率探空资料的云垂直结构进行判定是可行的,并且易于实现。但其精度如何,需要与之匹配的其他资料作对比验证。

4.2 云出现频率的统计分析

Wang 等^[13]通过在 GISSGCM 模式中的 13 个

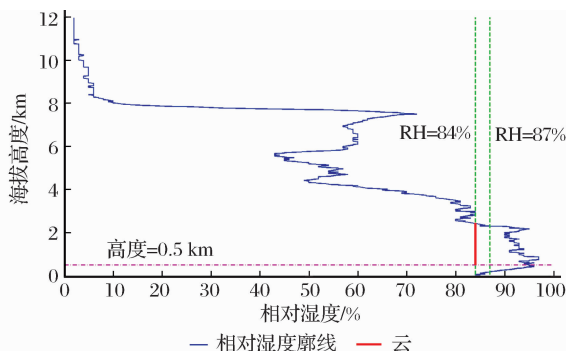


图 2 2007 年 1 月 2 日云垂直结构分析图(单层云)

Fig. 2 Analysis chart of cloud vertical structure in January 2, 2007 (single-layered cloud)

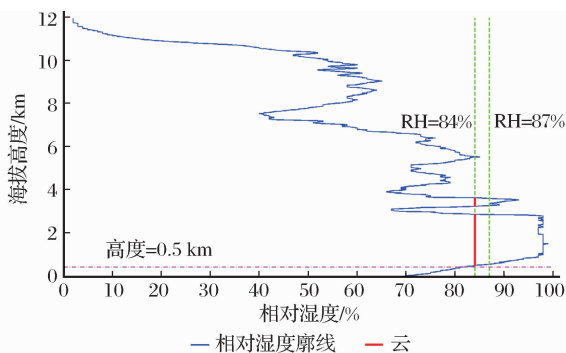


图 3 2007 年 1 月 10 日云垂直结构分析图(双层云)

Fig. 3 Analysis chart of cloud vertical structure in January 10, 2007 (two-layered cloud)

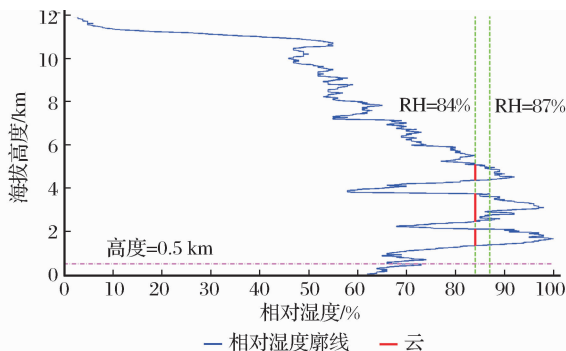


图 4 2007 年 6 月 21 日云垂直结构分析图(3 层云)

Fig. 4 Analysis chart of cloud vertical structure in June 21, 2007 (three-layered cloud)

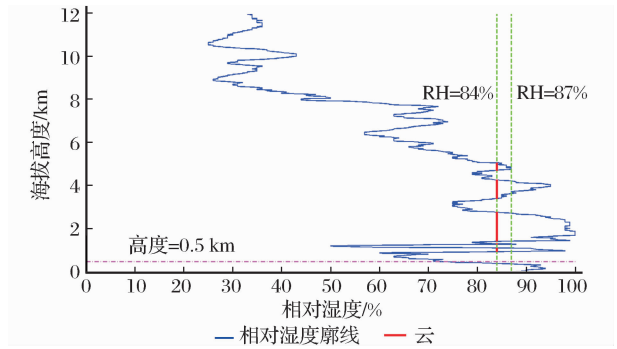


图 5 2007 年 1 月 3 日云垂直结构分析图(5 层云)

Fig. 5 Analysis chart of cloud vertical structure in January 3, 2007(five-layered cloud)

试验研究发现,云的层数将显著影响大气内部辐射的传输。因此,我们利用探空资料对德比尔特地区云层数的月变化和季节变化进行统计分析。单(多)层云的出现频率用式(1)^[16]计算得到。

$$f(i) = \frac{N_{\text{layer}}(i)}{N_{\text{cloud}}} \times 100\% \quad (1)$$

其中: N_{cloud} 表示研究区域内观测到的所有云总数, $N_{\text{layer}}(i)$ 表示该研究区域内观测到单(多)层云的廓线数,其中 $i=1,2,3,4$,分别表示单层云、双层云、3层云及4层以上。图6所示为德比尔特地区,单层云、双层云、3层云和4层及以上云的出现频率随月份的变化情况。图7所示为该区域内,单层云、双层云、3层云和4层及以上云的出现频率随季节的变化情况。通过分析图6、7发现:单层云的出现频率呈现出“冬高夏低”的特征,其中在夏季的6月份达到最小值为16.7%;而双层云的出现频率呈现“夏高冬低”的特征,其在夏季的6月份达到最大值为61%;另外,春季和秋季4层及以上云出现频率为0。同时对该地区2007全年的单层云和各多层云出现频率分析发现,该地区52.8%的云为单层

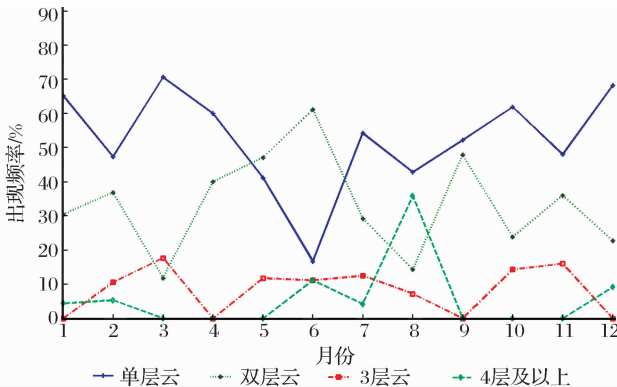


图 6 德比尔特地区云出现频率的月变化特征

Fig. 6 Monthly changed characteristic of the cloud occurrence frequency in De Bilt region

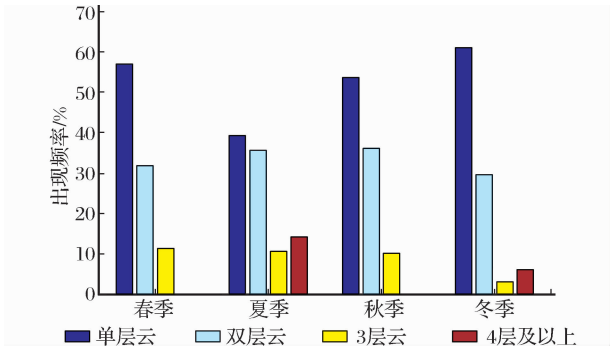


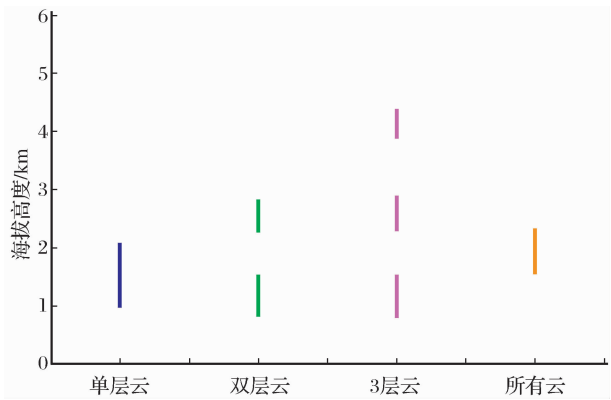
图 7 德比尔特地区云出现频率的季节变化特征

Fig. 7 Seasonal changed characteristic of the cloud occurrence frequency in De Bilt region

云,47.2%的云为多层云,其中71%的多层云为双层云,说明该地区主要分布以单层云和双层云为主,3层及以上云较少,这与韩丁等^[16]、吴春强^[17]对中国及周边地区进行云统计的结论非常相近。

4.3 云垂直结构参数的统计分析

利用2007年全年的探空资料对德比尔特地区的平均云顶高、云底高、云厚度和云层间晴空厚度等云垂直结构参数进行统计分析,如图8所示,结果表明:该地区所有云平均云底高和云顶高分别为1.5 km和2.3 km,并且得到了其他探测资料难以得到的平均云层厚度为0.8 km,及多层云中晴空的厚度,其中双层云中晴空厚度为0.75 km,3层云中上层与中层之间晴空厚度略大于中层与下层之间厚度,分别为0.8 km和1.0 km。



(多层云从上到下依次为上层云、中层云(3层云)、下层云)

图 8 德比尔特地区各云层高度的平均值

Fig. 8 The average cloud height in De Bilt region

为研究德比尔特地区云所有云各垂直结构参数及顶层云顶高度的频率分布曲线,利用下式计算所有云云底高、云顶高、云厚度及顶层云顶高的频率分布:

$$F(h) = \frac{N_{\text{vertical}}(h)}{N_{\text{cloud}}} \times 100\% \quad (2)$$

其中: N_{cloud} 表示观测区域内所有云总数, $N_{\text{vertical}}(h)$ 表示云底高度、云顶高度、顶层云顶高或厚度在 $(h - 0.5) \sim (h + 0.5)$ 之间的数目。经统计分析得到图 9 所示的频率分布图, 及图 10 所示的累积频率分布图。

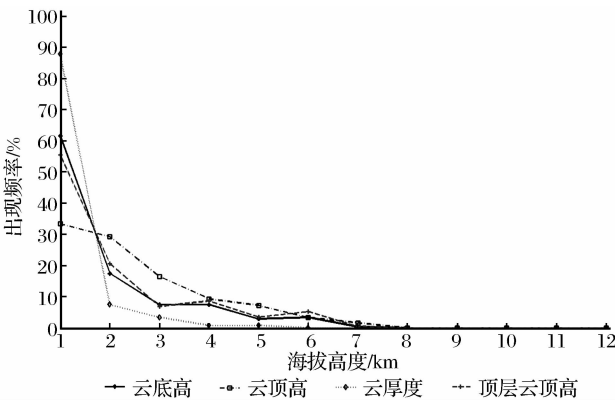


图 9 德比尔特地区所有云平均云底高、云顶高、云厚度、顶层云顶高的频率分布

Fig. 9 The frequency distribution of the mean cloud base height, cloud top height, cloud thickness and the highest cloud top height for all cloud

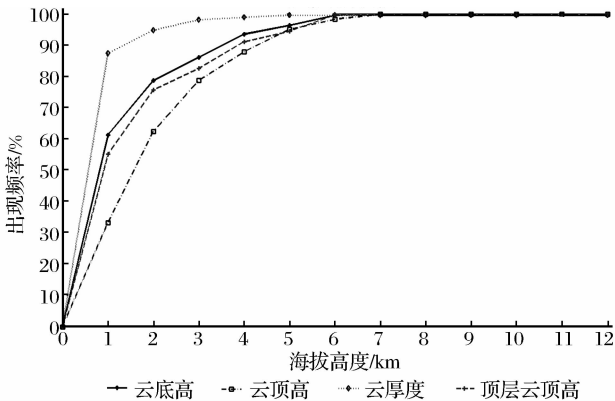


图 10 德比尔特地区所有云云底高、云顶高、云厚度、顶层云顶高累积频率分布

Fig. 10 The cumulative frequency distribution of the mean cloud base height, cloud top height, cloud thickness and the highest cloud top height for all cloud

通过分析图 9、10 发现, 研究区域内所有云的平均云底高度、云顶高度、顶层云顶高在 1~7 km 之间的各高度均有出现, 在较低高度出现的频率大于较高高度, 且主要集中在 4 km 及以下, 其累积频率分别达到 94%、90% 和 90%。且 1 km 所占比例最大, 分别为 61%、33% 和 55%; 云厚度随高度的增加急剧下降, 主要集中在 2 km 以下, 其在 1 km 左右, 出现频率达到 88%。

5 结 语

本文综合 Wang 等^[4]、张金强等^[8]云垂直结构相对湿度阈值判断法, 对高垂直分辨率的 RS92 探空资料的云底高和云顶高进行了判定, 通过对多个个例的云垂直结构分析, 表明采用改进的相对湿度阈值法来判断高垂直分辨率探空资料云垂直结构, 是可行的, 且该方法易于实现。

同时对德比尔特地区的云出现频率及垂直结构参数进行了统计分析, 结果表明: 该地区的云层主要以单层云和双层云为主, 3 层及以上云层较少, 且绝大多数云集中在 6 km 以下; 其单层云出现频率呈“冬高夏低”分布, 而双层云与其相反; 其所有云平均云底高、云顶高、云厚度、顶层云顶高的出现频率, 随高度的增加而减小。

探空仪探测系统, 作为一种常规的探测手段, 虽无法像卫星一样做到大区域、长时间、高精度探测, 但其站点分布广、探测数据丰富, 且随着垂直分辨率的提高, 其在准确获取低云云底信息方面却有常规卫星无法比拟的优势。需要指出的是, 在探测过程中, 探测仪器是随风水平漂移的, 得到的温、压、湿等廓线, 并不是测站上空的垂直廓线, 这将影响云参数的反演。另外, 利用相对湿度法进行云垂直结构判定, 精度有多高, 需要与其他探测资料进行对比试验, 这将是下一步的主要工作。

参考文献 (References):

[1] Sun Xuejin, Wang Xiaolei, Li Hao, *et al.* Atmospheric Sounding Science[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009. [孙学金, 王晓蕾, 李浩, 等. 大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2009.]

[2] Qiu Jinhuan, Lv Daren, Chen Hongbin, *et al.* Modern Research Progresses in Atmospheric Physics[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(4): 628-652. [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): 628-653.]

[3] Poore K D, Wang J H, Rossow W B. Cloud Layer Thicknesses from a Combination of Surface and Upper-air Observations [J]. Climate, 1995, 8(3): 550-568.

[4] Wang J H, Rossow W B. Determination of Cloud Vertical Structure from Upper-air Observations [J]. Journal Applied Meteorology, 1995, 34: 2243-2258.

[5] Chernykh I V, Eskridge R E. Determination of Clouds Amount and Level from Radiosonde Soundings [J]. Journal of Applied Meteorology, 1996, 35: 1362-1369.

[6] Wang J H, Rossow W B, Zhang Y H. Cloud Vertical Structure and Its Variations from 20-year Global Rawinsonde Dataset [J]. Journal of Climate, 2000, 13: 3041-3056.

- [7] Zhou Yuquan, Ou Jianjun. The Method of Cloud Vertical Structure Analysis Using Rawinsonde Observation and Its Applied Research[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(11): 50-58. [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.]
- [8] Zhang J Q, Chen H B, Li Z Q, *et al.* Analysis of Cloud Layer Structure in Shouxian, China Using RS92 Radiosonde Aided by 95 GHz Cloud Radar[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115, D00K30, doi:10.1029/2010JD014030.
- [9] Miloshevich L M, Vömel H, Whiteman D N, *et al.* Accuracy Assessment and Correction of Vaisala RS92 Radiosonde Water Vapor Measurements [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114, D11305, doi:10.1029/2008JD 011565.
- [10] Li Wei, Xing Yi, Ma Shuqing. The Analysis and Comparison Between GTS1 Radiosonde Made in China and RS92 Radiosonde of Vaisala Company[J]. Meteorological Monthly, 2009, 35(10): 97-102. [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] Xing Yi, Zhang Zhiping, Cao Yunchang, *et al.* Experiment and Analysis of GPS Radiosonde RS92 Performance[J]. Meteorological Science and Technology, 2009, 37(3): 336-340. [邢毅, 张志萍, 曹云昌, 等. RS92 型 GPS 探空仪的性能试验与分析[J]. 气象科技, 2009, 37(3): 336-340.]
- [12] Vaisala. Vaisala Radiosonde RS92 Wins the Tough WMO Intercomparison Test [EB/OL]. http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/.../RS92_210x280_LR.pdf, 2011-06-14.
- [13] Wang J H, Rossow W B. Effects of Cloud Vertical Structure on Atmospheric Circulation in GISS GCM[J]. Journal of Climate, 1998, 11(11): 3010-3029.
- [14] Li Jiming, Huang Jianping, Yi Yuhong, *et al.* Analysis of Vertical Distribution of Cloud in East Asia by Space-based LiDAR Data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(4): 1-10. [李积明, 黄建平, 衣育红, 等. 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, 2009, 33(4): 1-10.]
- [15] Wang Shuaihui, Han Zhigang, Xiang Jie. Feasibility Analysis of Cloud-base Height Retrieval Using a Combination of Active and Passive Satellite Data and Study of Cloud Macrophysical Characteristics[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2009. [王帅辉, 韩志刚, 项杰. 卫星主被动遥感联合反演云底高度可行性及云宏观特征分析[D]. 南京: 解放军理工大学, 2009.]
- [16] Han Ding, Yan Wei, Jia Benkai, *et al.* Research of Cloud Vertical Distribution around China based on Occultation Data[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(6): 1040-1045, 1227. [韩丁, 严卫, 贾本凯, 等. 基于掩星资料的中国地区云垂直分布研究[J]. 电波科学学报, 2011, 26(6): 1040-1045, 1227.]
- [17] Wu Chunqiang. Observational Analysis and Numerical Simulation of Cloud Radiative Characteristics in Chinese Region [D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010. [吴春强. 中国区域云辐射特征的观测分析与数值模拟[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2010.]

Determination of Cloud Vertical Structure and Analysis of Its Distribution based on RS92 Radiosonde Data

Zhang Riwei¹, Yan Wei¹, Han Ding¹, Yang Shuchen^{1,2}

(1. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

2. No. 91876 Army of PLA, Qinhuangdao 066203, China)

Abstract: Based on the being method of cloud vertical structure determination, combined with high-vertical-resolution radiosonde data, we modify the method of relative humidity threshold. And we determine the cloud vertical structure using the RS92 radiosonde data in De Bilt region in 2007, and analyze the occurrence frequency and the vertical distribution characteristic of cloud. The result shows that it is feasible to analyze the high-resolution radiosonde data of cloud vertical structure using the improved relative humidity threshold method. There are mainly single-layered and two-layered cloud in this region, and the occurrence frequency of signal-layered cloud shows the characteristic of “higher in summer and lower in winter”, the double-layered cloud is the opposite. The occurrence frequency of the mean cloud base height, cloud top height, cloud thickness and the highest cloud top height for all cloud increases with the height.

Key words: RS92 radiosonde; Relative humidity; Cloud vertical structure