李绍辉,孙学金,张日伟,等.探空资料云检测及其统计研究.气象科学,2017,37(3):403-408.
LI Shaohui, SUN Xuejin, ZHANG Riwei, et al. Cloud determination of radiosonde data and its statistical study. Journal of the Meteorological Sciences, 2017, 37(3): 403-408. doi: 10.3969/2016jms.0043

# 探空资料云检测及其统计研究

李绍辉 孙学金 张日伟 赵阳
(解放军理工大学 气象海洋学院,南京 211101)

**摘要** 基于已知的云垂直结构判断的方法,将相对湿度阈值法与温度露点法相结合,并加以改进,得到更加科学有效的云垂直结构判断方法。利用南京地区探空站的探空资料数据,分析得到了该地区的云垂直结构参数,并对全年云垂直结构特征进行了统计分析。经过统计分析发现:这种改进的相对湿度阈值法是科学有效的;南京地区夏秋季节有云的概率大,多层云的状况较多;春冬季节有云的概率相对较小,单层云的状况较多;云层厚度呈现出“夏厚冬薄”、中低云厚而高云薄的规律。

**关键词** 云垂直结构; 探空资料; 相对湿度; 温度露点差
**分类号**: P426.5 **doi**: 10.3969/2016jms.0043 **文献标识码**: A

# Cloud determination of radiosonde data and its statistical study

**LI Shaohui SUN Xuejin ZHANG Riwei ZHAO Yang**
(*School of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 211101, *China*)

**Abstract** Based on the known cloud vertical structure judgment method, combined with the relative humidity threshold method and the temperature dew point method, a more scientific and effective method was obtained. Moreover, the radiosonde data in Nanjing was used to collect the cloud vertical structure parameter of Nanjing, in order to statistically analyze the cloud vertical structure features. It was found that this new method is feasible; cloud occurs more frequently in summer and autumn in Nanjing than in spring and winter, especially for the multilayer cloud; and the cloud thickness is thicker in summer than in winter and decreases with the cloud height.

**Key words** Cloud vertical structure; Radiosonde data; Relative humidity; Temperature dewpoint method

## 引 言

根据ISCCP近20 a资料分析[1],地球上50%以上的面积在云层的覆盖下。云对大气辐射过程和气候变化[2]起着重要的调制作用。云是地球大气的热量、水分和动量平衡的重要因素,它不仅关系到局部地区和短时间的天气变化,而且还影响到大气环流和全球气候的变化;不仅如此,云层的分布还会对电磁波的传播、雷电现象以及大气污染物的传播产生影响[3]。因此,研究云的特征,包括云的垂直结构、云的季节变化等在气象领域是至关重要的。

本文将要统计研究的云底高度、云顶高度、云层厚度、云层之间距离以及多层云的分布特征等均为云的垂直结构特征。目前探测云垂直结构的手段较多,但都有其一定的不足和局限性。云幕灯、激光云幂仪等只能测量云底而无法确定云顶,对多层云的

**收稿日期**(Received):2015-10-30;**修改稿日期**(Revised):2016-03-22; **网络出版日期**(Published on-line):2017-07-17
**网络出版地址**:http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1243.P.20170717.1118.002.html
**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(41575020)
**通信作者**(Corresponding author):孙学金(SUN Xuejin). 1020279388@qq.com

天气条件也无能为力[4];卫星的观测一般较易获取云顶信息,对低云的探测效果不明显[5],极轨卫星不能对一地区长时间连续观测,静止卫星的探测纬度范围为0~60 °N,不能覆盖高纬度地区;云雷达发射长波辐射,可以根据雷达回波资料得到云垂直结构信息,但受到仪器限制只能若干站点观测,无法大范围布网[6,7]。所以找到一种不仅能大范围布网,而且能长时间连续探测云的垂直结构的方法是必要的。

大范围布网的无线电探空仪可以利用氢或氦气球在一定的时间内持续上升到 30 km 以上的高空,舱内搭载着温度传感器、湿度传感器、压力传感器等设备,在上升过程中通过发射天线将温度、湿度、气压等探空资料实时地传回地面。上升过程当中,无线电探空仪持续获得温度、湿度等信息,温湿参数又与云的形成息息相关,因此可以不断检测云的垂直结构特征。

本文采用温度露点差法找到云底,利用相对湿度法确定云顶以及云层厚度,将两者结合对 RS92 型探空仪资料进行分析。对南京地区的云的垂直结构进行了判定,并分析了云的季节变化、云层数以及云层厚度等分布规律。

## 1 探空仪资料

本文资料采用的是南京地区 2014 年全年每日两次的 Vaisala RS92 型探空仪资料数据,共有 530 次有效探空资料,其中有 95% 的探测高度大于 20 km。Vaisala 公司生产的 RS92 型探空仪为全数字调频式探空仪,上升过程中不断传送温度、气压以及湿度等数据,传送周期短,垂直分辨率比较高;探空仪内有一对温度传感器,分别对空气温度和舱内温度进行测量,便于调节温度系数;气球在上升过程中,大气温度逐渐降低,载有两个湿度传感器,可以交替加热使用,防止传感器失效影响测量[8]。本文中,采用温度露点差法找到云底高度,利用相对湿度法确定云层厚度和云顶高度,将两种方法结合起来分析南京地区的云的垂直结构。RS92 型探空仪技术指标如表 1 所示。

**表 1 RS92 型探空仪技术指标**

Table 1 Technical targets of RS92 radiosonde

| 项目 | 技术指标 |
|---|---|
| 测温范围 | -90~60 ℃ |
| 测温精度 | 0.2 ℃ |
| 测压范围 | 1 080~3 hPa |
| 测压精度 | 0.4 hPa |
| 测湿范围 | 0~100% |
| 测湿精度 | 2% |
| 测风精度 | 1 $m \cdot s^{-1}$ |
| 时间分辨率 | 2 s |
| 垂直距离分辨率 | 10 m |

## 2 云的垂直结构判定

目前利用探空资料分析云的垂直结构的方法只有 3 种:一是利用温度露点差阈值法[9]进行分析;二是通过计算温度和湿度随高度变化的二阶导数来进行分析(CE 法)[10];三是利用相对湿度阈值法进行判断(WR95 法)[11]。1995 年,WANG, et al[10]将云层和云内相对湿度关系进行统计对比分析,给出了极小值 84% 和极大值 87% 的相对湿度阈值,采用相对湿度阈值法分析云的垂直结构;2010 年,朱彦良等[12]利用相对阈值法结合探空资料对寿县地区的云的垂直结构进行统计分析,并且和云雷达进行对比分析其准确程度,效果较好。目前利用探空资料分析云的垂直结构中,应用范围最广,技术最成熟的就是相对湿度阈值法。但其也存在一定的不足,当出现降水和大雾时,地表的相对湿度大于 84%,这样就给云底高的判断造成了困难[13]。然而温度露点差判定方法则不受相对湿度大小的影响,只取决于所在大气层的温度范围和温度露点差大小。所以利用温度露点差阈值法确定最下层云底高度,利用相对湿度阈值法确定云层厚度和云顶高度,将两者结合对南京地区的云的垂直结构进行判断。

### 2.1 温度露点差法

设定一个温度露点差阈值,记为 $\Delta T_d$,如果其小于相应的阈值则相应湿度层定义为大气的云层。判断在不同高度处的温度露点差与阈值的大小关系,即可判定云的垂直结构[14],温度露点差小于阈值则视为云层,否则认为不是云层。1994 年,Poore, et al[18]根据分析俄克拉荷马州 1 a 的探空资料分析,改进了 Air Weather Service(AWS)1979 年提供的阈值设定标准。当气层温度大于零度时,阈值设为 1.7 ℃;当气层温度介于-20~0 ℃之间时,阈值设为 3.4 ℃;当气层温度小于-20 ℃时,阈值设为5.2 ℃。参数如表 2 所示。

**表 2　阈值分布表**

Table 2　Threshold distribution

| 温度范围 | $\Delta T_d$ 阈值 |
|---|---|
| $T>0$ ℃ | $\Delta T_d=1.7$ ℃ |
| $-20$ ℃$\leqslant T\leqslant 0$ ℃ | $\Delta T_d=3.4$ ℃ |
| $T\leqslant -20$ ℃ | $\Delta T_d=5.2$ ℃ |

本文利用温度露点差法来分析云的垂直结构特征,找到最下层的云底高度。

## 2.2　相对湿度阈值法

相对湿度阈值法对云垂直结构特征的判定基于3个标准:(1)当大气温度在0 ℃以下时,相对湿度的计算方法发生变化,用实际水汽压与冰面的饱和水汽压的比值得到新的相对湿度值;(2)云层中,最小相对湿度值不小于84%,最大相对湿度值不小于87%;(3)云层中,从云底到云顶的相对湿度跳变值大于3%,,且在云顶有负的跳变,在云底有正的跳变[16]。基于以上3个标准,云的垂直结构判断如表3所示,同时满足以下3个条件,才可判定为云层。

**表 3　相对湿度阈值法**

Table 3　Relative humidity threshold method

| 判断条件 | $RH$ 阈值 |
|---|---|
| 1 | $RH_{min}\geqslant 84\%$ |
| 2 | $RH_{min}\geqslant 87\%$ |
| 3 | $RH_{top}-RH_{bottom}>84\%$ |

其中,$RH_{min}$为该气层最小相对湿度,$RH_{min}$为最大相对湿度,$RH_{top}$为气层顶部湿度值,$RH_{bottom}$为气层底部湿度值。

本文利用相对湿度阈值法来判定云的垂直结构特征,确定了云顶高度以及云层的厚度,并对南京地区探空资料进行统计分析。

# 3　云层垂直结构特征及统计分析

根据温度露点差阈值法和相对湿度阈值法,对南京地区2014全年云的垂直结构特征进行了统计分析,包括云底高、云顶高、云层数、云分类以及云的出现概率。国际云图分类表明[17],将云层高度小于2 500 m则定义为低云;云层高度大于2 500 m并且小于5 000 m则定义为中云;云层高度在5 000 m以上则定义为高云。

图1a为南京地区2014年1月15日云垂直结构与相对湿度的关系图,蓝色实线为相对湿度廓线,黑色实线部分为所判定的云层。采用相对湿度法,云层在0~2 800 m高度小于5 000 m,判定为中低云。图1b为南京地区2014年1月15日云垂直结构与温度露点差的关系图。图中不同虚线分别代表在不同的温度下,温度露点差的阈值,温度露点差廓线在阈值虚线左侧的部分即视为云层。采用温度露点差法,云层在240~3 400 m,以及6 100~7 700 m均有分布。云层高度分布范围较广,判定为高云、中云、低云都存在。由此可知,这两种方法存在着一定的差异。

图1a中大气相对湿度从底面开始就大于84%,因此无法直接采用相对湿度法确定云底高度,而图1b采用温度露点差法,可以发现在240 m高度以上,温度露点差开始小于1.7 ℃,因此云底高度可以定在240 m的高度处。当高度达到4 000 m以上,温度露点差的阈值变为5.2 ℃,在6 100~7 700 m范围内温度露点差小于该阈值,满足云层的条件,但是在这些高度范围内相对湿度小于84%,可以认为此处温度露点差得到的云层不是真实的,为大气的湿层。

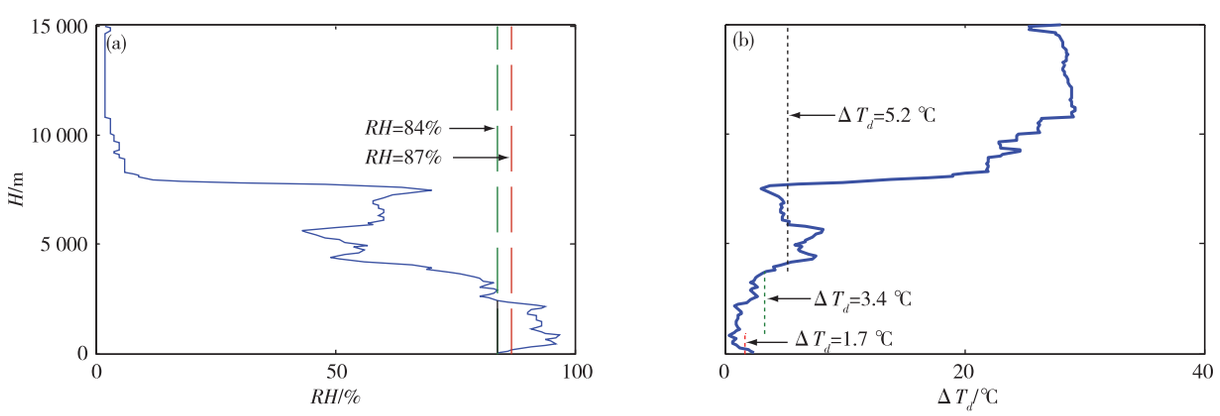


图1　2014年1月15日云垂直结构:(a)相对湿度廓线;(b)温度露点差廓线

Fig.1　Cloud vertical structure on January 15, 2014: (a) relative humidity profile; (b) temperature dew point profile

将两种方法得到的云层进行对比可知,在中低层云的垂直结构特征较为一致。采用温度露点差法得到的云层数较多,失真较为明显,准确程度不如相对湿度法。因此利用温度露点差阈值法确定云底高度,利用相对湿度阈值法确定云层厚度和云顶高度,将两者结合对云的垂直结构进行判断更加科学有效。

如图 2 所示为南京地区 2014 年 7 月 23 日的云垂直结构分析图,图 2a 利用相对湿度阈值法确定云层厚度和云顶高度,同时滤除云底高数据,图 2b 利用温度露点差阈值法确定云底高度。可见当天大气由下至上分别为低云、中云、高云。

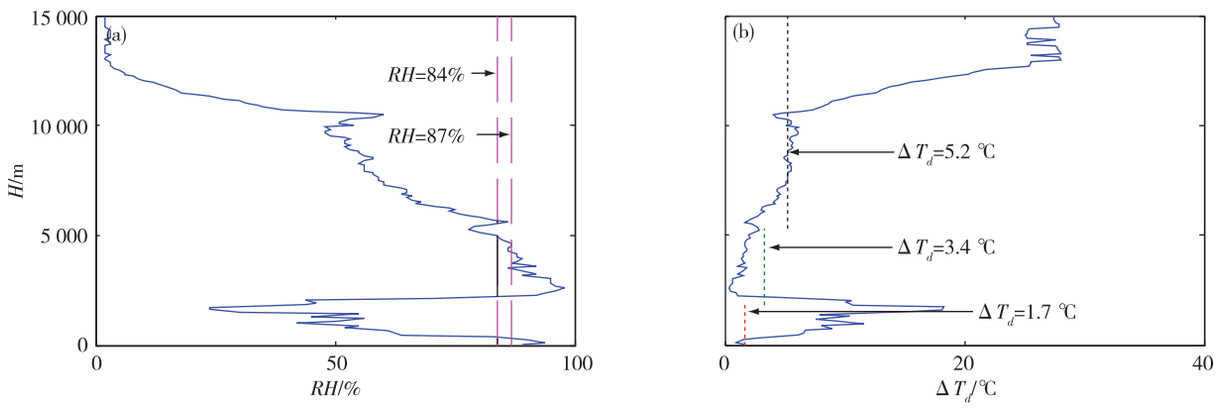


图 2 2014 年 7 月 23 日云垂直结构:(a)相对湿度廓线;(b)温度露点差廓线

Fig.2 Cloud vertical structure on July 23, 2014: (a) relative humidity profile; (b) temperature dew point profile

## 3.1 云参数的季节变化的统计分析

对南京地区全年 530 次有效探测资料进行统计,分别对不同季节有无云、云层数、云底高等进行了分析。

1998 年,WANG, et al[18] 在 GISSGCM 模式中的若干试验结果中发现,云的层数对大气内部的辐射传输有着显著的影响。因此我们利用探空资料对南京地区云层变化进行统计分析。

如表 4 所示,为 2014 年逐月的云统计规律,晴天表明探空仪没有探测到云层;有云表明探空仪能够探测到云层;单层云是只探测到低云,多层云是指不仅探测到了低云,还有中云或高云。单层云出现的频率和多层云出现的频率之和为该月份有云的频率。

**表 4 2014 全年云参数(%)**

Table 4 Cloud parameters in 2014

| 月份 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 有云 | 34 | 38 | 29 | 41 | 46 | 76 | 89 | 84 | 88 | 73 | 43 | 39 |
| 晴天 | 66 | 62 | 71 | 59 | 54 | 24 | 11 | 16 | 12 | 27 | 57 | 61 |
| 单层云 | 16 | 29 | 23 | 8 | 12 | 21 | 28 | 25 | 32 | 28 | 21 | 33 |
| 多层云 | 18 | 9 | 6 | 33 | 34 | 55 | 61 | 59 | 56 | 45 | 22 | 6 |

如图 3 所示,根据 2014 年逐月的云统计规律得到云随季节变化的规律。结果表明:从云的季节分布可得,夏季出现云的频率最大,达到 84%;秋季出现云的概率次之,达到 68%;春冬季节出现云的频率较低,不足 40%。从云层数分布可知,夏季多出现多层云,而冬季则以单层云为主。造成这种现象的原因是:夏季温度高,空气对流旺盛,空气上升运动强烈,上升到高空形成云,所以夏季云多;而相反冬季温度低,对流运动不强烈,所以冬季云少。

本文对 2014 年全年高、中、低云的云顶高和云底高以及云层厚度进行了统计,如表 5 所示。

如图 4 所示,为 2014 全年各个月的低云的云底、云顶以及云厚的分布情况。图 4a 为低云的垂直分布特征,可以看出全年各月云底高都在 1.3 km 以下,4 月达到最高值,2 月最低。低云顶高与云底高规律相似。图 4b 为中云的垂直分布特征,表明中云底高春冬季节高于夏秋季节,而中云顶高度夏秋季节较高,6月为最高值,达到4.8 km。图4c为高云

**表 5　2014 全年云高及云厚统计(单位:km)**

Table 5　Cloud height and thickness statistics in 2014 (unit: km)

| 月份 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 低云底 | 0.8 | 0.4 | 0.9 | 1.2 | 0.9 | 1.1 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.8 | 1.0 | 0.9 |
| 低云顶 | 1.4 | 1.1 | 1.6 | 2.6 | 2.1 | 2.3 | 2.4 | 2.2 | 2.2 | 2.1 | 1.9 | 2.3 |
| 低云厚 | 0.6 | 0.7 | 0.7 | 1.4 | 1.2 | 1.2 | 1.5 | 1.4 | 1.5 | 1.3 | 0.9 | 1.4 |
| 中云底 | 3.4 | 2.9 | 3.4 | 3.1 | 3.1 | 3.3 | 2.7 | 2.8 | 2.9 | 2.6 | 2.7 | 2.9 |
| 中云顶 | 4.2 | 3.7 | 3.7 | 3.9 | 4.3 | 4.7 | 4.5 | 4.4 | 4.3 | 3.7 | 3.8 | 3.9 |
| 中云厚 | 0.8 | 0.8 | 0.3 | 0.8 | 1.2 | 1.4 | 1.8 | 1.6 | 1.4 | 1.1 | 1.1 | 1.0 |
| 高云底 | 5.1 | 5.6 | 6.8 | 5.5 | 4.7 | 6.1 | 6.1 | 6.2 | 6.1 | 5.9 | 6.4 | 7.9 |
| 高云顶 | 5.5 | 6.6 | 7.2 | 6.7 | 5.7 | 6.8 | 7.5 | 7.4 | 7.2 | 6.5 | 7.2 | 8.3 |
| 高云厚 | 0.4 | 1.0 | 0.4 | 1.2 | 1.0 | 0.7 | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 0.6 | 0.8 | 0.4 |

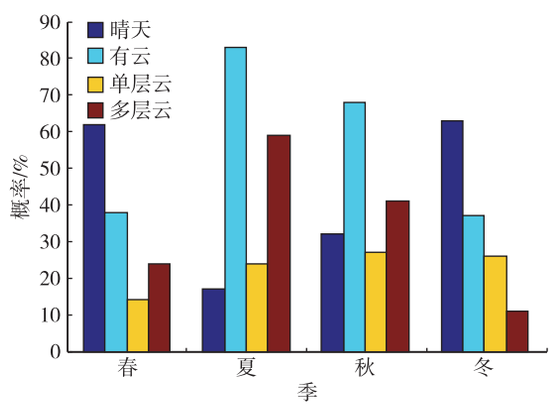


图 3　2014 年云的季节变化规律

Fig.3　Seasonal variation of cloud in 2014

的垂直分布特征,高云的底部和顶部的高度季节变化较大,没有明显规律,这是由于在不同季节高云出现的频率差别较大。图 4d 为不同高度处云层厚度,无论哪一种类型的云,都显示夏半年(4—9 月)的云层厚度明显高于冬半年(10—3 月)的云层厚度。其中,7 月各类云层厚度最大,这是由于夏季空气对流活动旺盛,导致了云的垂直方向发展比较深厚。

## 4　结束语

本文结合温度露点差阈值法和相对湿度法,对具有高垂直分辨率的 RS92 型探空仪资料的云底高

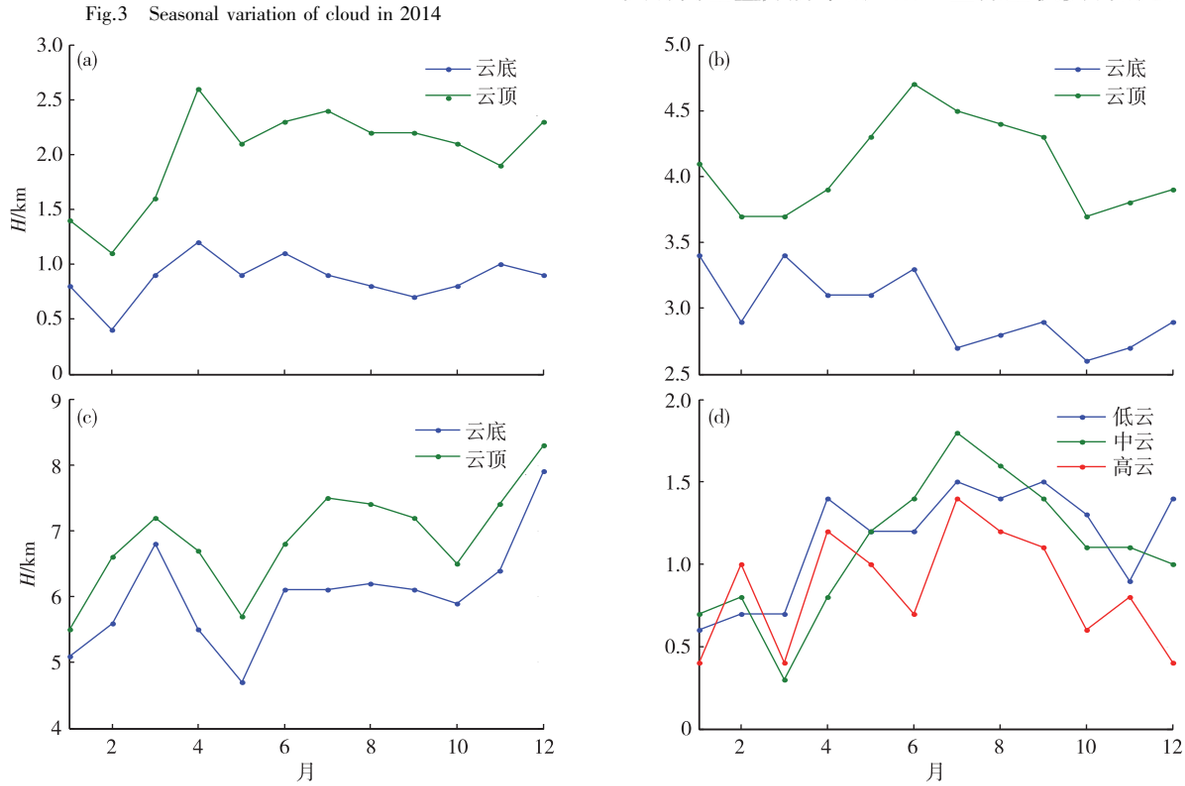


图 4　2014 年低、中、高云垂直分布:(a)低云;(b)中云;(c)高云;(d)云厚

Fig.4　Cloud vertical structure in 2014: (a) low clouds; (b) medium cloud; (c) high cloud; (d) cloud thickness

和云顶高进行了判定,通过对资料的统计分析,表明采用温度露点差阈值法确定云底高,用相对湿度法确定云顶高的方法是科学有效的,且易于实现。

探空仪系统探测数据丰富、分布站点广、垂直分辨率高,在云检测方面有着显著的优势。但是随着高度的升高,探空仪会随风横向漂移,测得参数廓线不是站点上空垂直廓线,对云的反演有一定影响。另外,为了分析相对湿度与温度露点差相结合的方法的精度,下一步的主要工作是将该方法与其他探测方式的结果进行对比分析。

## 参 考 文 献


[1] 丁守国, 石广玉, 赵春生. 利用 ISCCP D2 资料分析近 20 a 全球不同云类云量的变化及其对气候可能的影响. 科学通报, 2004, 49(11): 1105-1111.
DING Shouguo, SHI Guangyu, ZHAO Chunsheng. Analyzing global trends of different cloud types and their potential impacts on climate by using the ISCCP D2 dataset. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 2004, 49(12): 1301-1306.

[2] 彭杰, 张华. 典型站点气溶胶对云特性的影响. 大气科学学报, 2015, 38(4): 465-472.
PENG Jie, ZHANG Hua. Impact of aerosols on cloud properties at typical sites. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2015, 38(4): 465-472.

[3] 樊雅文, 黄兴友, 李锋. 毫米波雷达测云个例研究. 大气科学学报, 2013, 36(5): 554-559.
FAN Yawen, HUANG Xingyou, LI Feng. A case study on cloud measurement with a 35 GHz millimeter-wave cloud radar. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2013, 36(5): 554-559.

[4] Warren S G, Hahn C J, London J. Simultaneous occurrence of different cloud types. J. Appl. Meteor., 2010, 24(7): 658-667.

[5] 李浩然, 孙学金, 刘磊, 等. 基于模板匹配的云底高度估计. 气象科学, 2015, 35(5): 610-615.
LI Haoran, SUN Xuejin, LIU Lei, et al. Cloud base height estimation based on template matching. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2015, 35(5): 610-615.

[6] Fomin B A, Falaleeva V A. The vertical structure of aerosols and clouds derived from satellites equipped with high-resolution polarization sensors. Int. J. Remote Sens., 2014, 35(15): 5800-5811.

[7] 王德旺, 黄宁立, 谢潇, 等. 35 GHz 云雷达反射率因子数据的质量控制. 气象科学, 2014, 34(5): 508-514.
WANG Dewang, HUANG Ningli, XIE Xiao, et al. Quality control on reflectivity factor data of 35 GHz-cloud radar. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2014, 34(5): 508-514.

[8] 吴昊, 黄兴友, 杨荣康, 等. 两种探空仪判别云垂直结构的对比研究. 气象科学, 2014, 34(3): 267-274.
WU Hao, HUANG Xingyou, YANG Rongkang, et al. Comparative analysis on vertical structure of clouds by Vaisala RS92 and Changfeng radiosonde. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2014, 34(3): 267-274.

[9] Poore K D, WANG Junhong, Rossow W B. Cloud layer thicknesses from a combination of surface and upper-air observations. J. Climate, 1995, 8(3): 550-568.

[10] WANG Junhong, Rossow W B. Determination of cloud vertical structure from upper-air observations. J. Appl. Meteor., 1995, 34(10): 2243-2258.

[11] Chernykh I V, Eskridge R E. Determination of cloud amount and level from radiosonde soundings. J. Appl. Meteor., 1996, 35(8): 1362-1369.

[12] 朱彦良, 凌超, 陈洪滨, 等. 两种再分析资料与 RS92 探空资料的比较分析. 气候与环境研究, 2012, 17(3): 381-391.
ZHU Yanliang, LING Chao, CHEN Hongbin, et al. Comparison of two reanalysis data with the RS92 radiosonde data. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2012, 17(3): 381-391.

[13] 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. 电波科学学报, 2011, 26(6): 1040-1045.
HAN Ding, YAN Wei, JIA Benkai, et al. Research of cloud vertical distribution around China based on occultation data. Chinese Journal of Radio Science (in Chinese), 2011, 26(6): 1040-1045.

[14] 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. 气象, 2010,36(11): 50-58.
ZHOU Yuquan, OU Jianjun. The method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research. Meteorological Monthly (in Chinese), 2010,36(11): 50-58.

[15] Poore K D, WANG Junhong, Rossow W B. Cloud layer thicknesses from a combination of surface and upper-air observations. J. Climate, 1995, 8(3): 550-568.

[16] 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. 遥感技术与应用, 2012, 27(2): 231-236.
ZHANG Riwei, YAN Wei, HAN Ding, et al. Determination of cloud vertical structure and analysis of its distribution based on RS92 radiosonde data. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 2012, 27(2): 231-236.

[17] 孙学金, 王晓蕾, 李浩, 等. 大气探测学. 北京: 气象出版社, 2009: 155-157.
SUN Xuejin, WANG Xiaolei, LI Hao, et al. Atmospheric sounding. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 2009: 155-157.

[18] WANG Junhong, Rossow W B. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM. J. Climate, 1998, 11(11): 3010-3029.