

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.02.001

# 可见光/红外全天空成像仪和云雷达 联合反演云高

苏源<sup>1</sup>, 吴林林<sup>2\*</sup>, 陶法<sup>3</sup>, 胡树贞<sup>3</sup>, 程欣<sup>1</sup>

(1 合肥市气象局, 安徽 合肥 230041;

2 安徽省人工影响天气办公室, 安徽 合肥 230031;

3 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

**摘要:** 为解决大部分设备无法单独获取全天空云底高度的问题, 基于中国气象局大气探测基地可见光/红外天空成像仪和毫米波云雷达2019年6月的灰度值与云底高度数据, 利用辐射传输模式计算地面8~14  $\mu\text{m}$ 波段向下红外辐射随天顶角的变化关系, 并根据红外波段测得的天顶云底灰度值与非天顶位置的天顶角余弦灰度值之间的线性关系, 从而反演得到全天空云底高度。结果表明: (1) 相比于全天无云的情形, 在一天的相同时间时, 全天有云时的天顶灰度值较高。(2) 当云底高度为2000 m以上且云层较厚时, 云底高与红外模块所测灰度值的相关性明显好于云层较薄的低云。(3) 2019年8月12日的个例验证结果显示, 反演云高与通过云雷达测得的实际云高相关系数为0.956, 而与取天顶附近约30°天顶角得到的云高相关系数为0.9508。

**关键词:** 全天空成像仪; 云雷达; 灰度值; 云底高

中图分类号: P414.9+1

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)02-089-010

## Joint inversion of cloud height by visible/infrared full sky imager and cloud radar

SU Yuan<sup>1</sup>, WU Linlin<sup>2\*</sup>, TAO Fa<sup>3</sup>, HU Shuzhen<sup>3</sup>, CHENG Xin<sup>1</sup>

(1 Hefei Meteorological Bureau National Basic Weather Station, Hefei 230041, China;

2 Weather Modification Office of Anhui Province, Hefei 230031, China;

3 Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that most of the equipments cannot obtain the whole sky cloud base height independently, based on the grey value and the cloud base height data measured by the visible / infrared sky imager and the millimeter wave cloud radar measured at the China Meteorological Administration Atmosphere Detection Base in June, 2019, the relationship between the downward infrared radiation of ground in 8-14  $\mu\text{m}$  band and the zenith angle is calculated using Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer mode, and then according to the linear relationship between the gray value

基金项目: 合肥市气象科研项目、合肥市气象局自立课题 (HFZL202206)

作者简介: 苏源 (1978-), 女, 北京人, 高级工程师, 主要从事大气综合探测方面的工作及研究。E-mail: 9816663@qq.com

收稿日期: 2021-07-22; 修改日期: 2021-08-25

\*通信作者。E-mail: wulinlin@foxmail.com

of the zenith cloud base measured in the infrared band and the cosine gray value of the zenith angle at the non-zenith position, the cloud base height of the whole sky is retrieved. The results show that, (1) compared with that in cloudless day, the zenith gray value is higher when there is cloud all day at the same time during a day. (2) When the cloud base height is more than 2000 meters and the cloud base is thick, the correlation between the cloud base height and the gray value measured by the infrared module is significantly better than that of the low clouds with thin cloud layer. (3) The case verification on August 12, 2019 shows that the correlation coefficient is 0.956 between the inversion cloud height and the actual cloud height measured by cloud radar, while the correlation coefficient between the inversion of cloud height and the cloud height obtained by taking the zenith angle of about  $30^\circ$  near the zenith is 0.9508.

**Key words:** all-sky imager; cloud radar; grey value; cloud base height

## 0 引言

云是大气中水蒸气凝结成的小液滴或小冰晶体,是漂浮在空气中的可见聚合物的混和体。在地球—大气环境系统中,云是调节气候的一个重要因素<sup>[1]</sup>。云的变化对于辐射和全球气候的影响非常重要,由于云在时空分布上的变化非常复杂<sup>[2]</sup>,因此云的研究越来越受到研究人员的普遍关注,在天气分析与预报、人工影响天气以及民生、经济等领域也变得越来越大<sup>[3]</sup>。近年来,云高的研究,包括云雷达与激光云高仪对云高的对比研究<sup>[4,5]</sup>以及云雷达、全天空成像仪与激光雷达对云高的对比等<sup>[6]</sup>,也越来越受到众人的关注。云底高度决定了云的种类以及降水概率的大小<sup>[5]</sup>,也是影响地球辐射收支的重要参数之一<sup>[7]</sup>。如何准确地得到天空中云的宏观分布,是大气探测亟需解决的课题。

云底高度是云物理学研究中最基本、最重要的参数之一。目前对云底高度的探测方式繁多,但由于探测原理不同,导致不同方法获得的云高观测数据相差较大。因此对不同方法获得的测量结果进行对比验证,系统地比较和分析其精度和差异,原则上需要对数据进行修正,以提高多源云基高度观测资料的相似性和一致性<sup>[8]</sup>。对于云底高度和厚度,激光测云仪和云雷达都只能对天顶方向的云进行观测,而无法进行全天空云高的测定。国内对于利用双波段全天空成像仪和云雷达反演全天空云高的研究还相当匮乏。

本研究所场地为中国气象局气象探测中心北京南郊大气探测综合试验探测基地,基于国产Ka波段毫米波测云仪和可见光/红外全天空成像仪的数据,以毫米波云雷达观测的云底高度为参考,与可见光/红外全天空成像仪反演的云高进行比对验证,对云雷达测得的云高与红外波段得到的灰度值进行拟合,分析两者的相关特性,再根据辐射传输模型模拟计算地面 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段向下红外辐射随天顶角的变化关系,最后利用全天空云底灰度值反演云高并进行对比验证。

## 1 观测设备和理论基础

### 1.1 可见光/红外全天空成像仪

所使用的可见光/红外全天空成像仪是由中国科学院大气物理研究所和江苏省无线电科学研究所有限公司合作推出的可见光/红外全天空红外扫描成像系统,如图1所示,主要包括两个模块:可见光成像模块和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 红外成像模块。利用该成像仪采集全天空立体图像,得到4023个点的红外亮温,继而得到全天空

红外辐射的分布, 再经过辐射标定修正等处理<sup>[9]</sup>, 最后反演得到云底高度以及云量信息。其中红外模块系统的响应时间为 120 ms, 温度精度为 0.1℃, 可连续在 -20~85℃ 的环境条件下工作。该红外波段模块具有较小的视场角,  $D:S = 34:1$  ( $D$  为传感器头部到被测物的距离,  $S$  为测量点直径的大小), 考虑云体一般较大, 该设备完全满足对云体温度的测量要求。

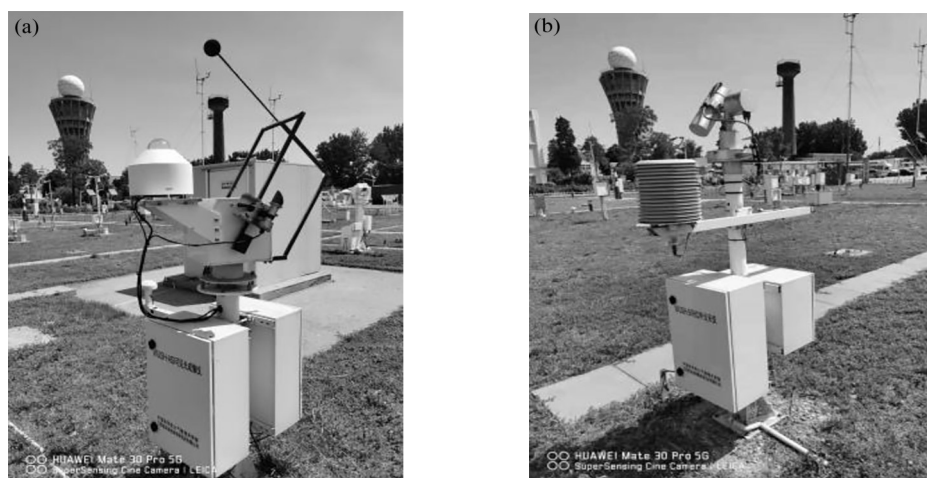


图 1 可见光/红外全天空成像仪。(a) 可见光成像仪; (b) 红外全天空成像仪

Fig. 1 Visible/infrared full sky imager. (a) Visible light imager; (b) infrared full sky imager

## 1.2 毫米波云雷达

所使用的毫米波云雷达是由中国气象局气象探测中心、西安华腾微波有限责任公司和成都信息工程大学联合研制的 YLU1 型 Ka 波段毫米波测云仪 (对顶式雷达), 如图 2 所示, 它可以穿透云层, 得出云体的整体结构信息<sup>[10]</sup>, 该云雷达是探测云层三维精细结构的重要工具<sup>[11]</sup>。表 1 为该毫米波云雷达性能指标。



图 2 YLU1 型 Ka 波段毫米波云雷达

Fig. 2 YLU1 Ka-band millimeter-wave cloud radar

表 1 毫米波云雷达性能指标

Table 1 Performance indicators of millimeter-wave cloud radar

Parameter		Specification	
Radar type		ZHD_KFS	
Radar system		All-solid, all-coherent, pulse Doppler	
Scanning way		Vertical overhead fixed pointing	
Working frequency/GHz		94	35
Antenna scanning mode	Azimuth	Not supported	Not supported
	Elevation/(°)	90	90
Antenna aperture/m		≥ 0.5	≥ 1.2
Peak transmitter power/W		≥ 2	≥ 20
Detection range/km		≥ 10	≥ 15
Resolution	Range/m	≤ 15	≤ 30
Parameter measurement range	Reflectivity/dBz	-60~+20	-50~+50
	Velocity/(m·s <sup>-1</sup> )	-9~+9	-26~+26
	Spectral width/(m·s <sup>-1</sup> )	0~9	0~16
Parameter measurement accuracy	Reflectivity/dBz	≤ 1	≤ 1
	Velocity/(m·s <sup>-1</sup> )	≤ 0.5	≤ 0.5
	Spectral width/(m·s <sup>-1</sup> )	≤ 0.5	≤ 0.5
The minimum reflectivity factor can be detected at 10 km/dB		≥ 40	≥ 40

### 1.3 观测资料获取

所用资料包括 2019 年 6 月所有有云的天气条件下, 在中国气象局南郊综合试验基地中的可见光/红外双波段全天空成像仪与毫米波云雷达连续并行观测的资料, 表 2 为上述设备获取的主要参数。其中有云天数为 19 天, 每 10 min 获得一组数据。红外传感器遥感的天空图像, 其像元亮度值是灰度值, 是无单位的整数数值。

表 2 系统各设备获取主要参数

Table 2 Main parameters obtained by each device of the system

Equipment	Detection elements
Millimeter wave cloud radar	Reflectivity profile, cloud bottom, cloud top, cloud thickness
Dual band sky imager	Cloud amount, infrared brightness temperature diagram

将分别从以下五个方面进行比对分析: 1) 全天有云和全天无云的两天在一天中同一时间有云和无云条件下灰度值的对比。2) 天顶红外亮温值(灰度值)与天顶方向毫米波云雷达云高值的相关性。3) 选取云厚一定的条件下, 从云高 < 1000 m、1000 m < 云高 < 6000 m、云高 > 6000 m 三种情况, 对云雷达获取的云底高度与双波段全天空成像仪的灰度值进行相关性分析, 以对云高和灰度值进行质控。4) 通过做线性回归, 结果应用在个例上。5) 根据天顶云底灰度值与不在天顶位置的天顶角余弦灰度值之间的线性关系, 反演得到非天顶位置的云底高度。

### 1.4 向下红外辐射反演云高理论基础

从地面向天空任意方向观测, 在热红外波段 (8~14 μm) 均可感测到来自该方向的热辐射。在 8~14 μm

波段中,对于相同光学厚度的云,天顶方向向下红外辐射随云底高增加而减少<sup>[12]</sup>,云越高,云底温度越低,从而向下红外辐射越小;红外辐射随天顶角增加而变大,在天顶附近与天顶角余弦呈线性关系<sup>[13]</sup>,其表达式为

$$L = k \cos x + b, \quad (1)$$

式中  $L$  为红外辐射值,  $x$  为在天顶附近红外辐射入射方向和天顶方向的夹角(即天顶角),  $k$ 、 $b$  为拟合系数。

## 2 云高联合反演方法

### 2.1 有云条件下灰度值与云高关系

毫米波云雷达测得天顶云高,用121组不同日期的同一时刻全天有云和无云时灰度值的变化作对比,如图3所示,其中横坐标时序为00:00到23:50的时间区间中每10 min的一个有效数据(去除缺测时刻数据)。由图可知有云时天顶灰度值较高。

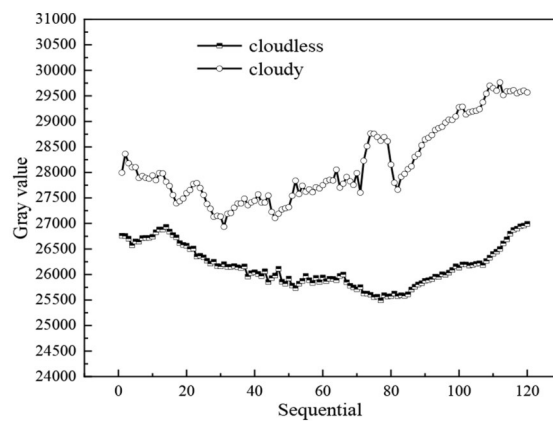


图3 同时间有云和无云灰度值对比

Fig. 3 Comparison of gray values with and without clouds at the same time

选取北京南郊2019年6月有云天气下的云高,对应其灰度值的有效数据共1119组云高数据样本,拟合云底高度与天顶灰度值关系如图4所示。由于云雷达的噪点误差等原因,去除云底高小于2000 m的低云。为了便于计算,选取红外云图中天顶中心周围方向100个灰度值的平均值做为某一时刻天顶方向的灰度值。由图可知,未做质控的情况下,两者相关系数较差。因为某些云体较薄,而较薄的云层由于透明度较高,导致云雷达在获取云底高度时误差明显。

由于毫米波云雷达与云粒子都具有小粒子尺度的短波长,并且具有较高的时空分辨率,能够更准确地反映云的垂直和水平结构<sup>[14]</sup>,但毫米波云雷达对云高较低、云体较薄的云的探测能力不够。而双波段天空成像仪对5 km以下中低云,观测结果较好;对于5 km以上中高层云,如果云层较厚,云粒子较浓,观测结果较好,对云层较薄的高层云,观测误差较大。

云是热红外波段的强发射体,当云层的光学厚度达到9时,在热红外波段就可视为黑体,以云底高度所具有的温度向观测点作黑体辐射<sup>[15,16]</sup>。因此,结合云雷达与双波段全天空成像仪的优缺点,在云厚达到一定厚度的情况下,对6月份数据按云底高度进行相关性分析,以达到对数据进行质控的目的。结果如下:

如图5所示,当云底高度较低时,由于毫米波云雷达对低云的观测能力不够,观测数据结果不具代表性,故云高与云高相对应的灰度值没有相关性。

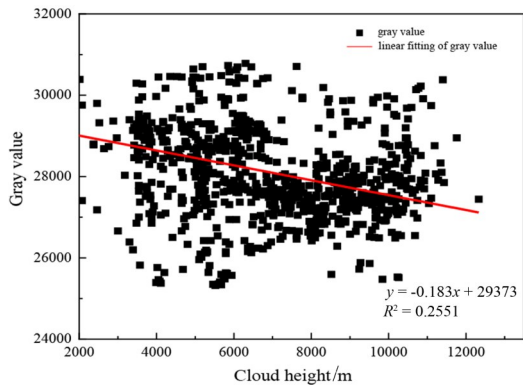


图4 质控前2019年6月份云高与灰度值散点图  
Fig. 4 Scatter diagram of cloud height and gray value before quality control in June, 2019

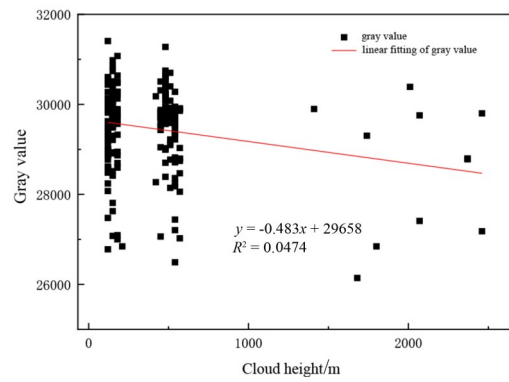


图5 2500 m以下的低云云高与灰度值散点图  
Fig. 5 Scatter diagram of low cloud height and gray value below 2500 m

如图6所示,当云高大于2500 m且小于6000 m时,排除云层较薄的云以及云雷达在测量云底高度时的错值,云底高度与灰度值的相关系数为-0.674,相关性较好。

如图7所示,当云高大于6000 m时,选取云层较厚的中云及高云,由社会科学统计软件包计算可知,云底高度与灰度值的相关系数为-0.521,相关性较好。

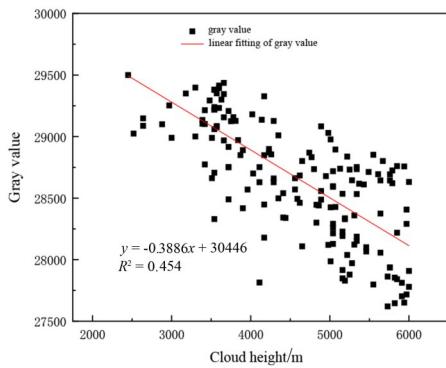


图6 6000 m以下的中云云高与灰度值散点图  
Fig. 6 Scatter diagram and correlations of medium cloud height and gray value below 6000 m

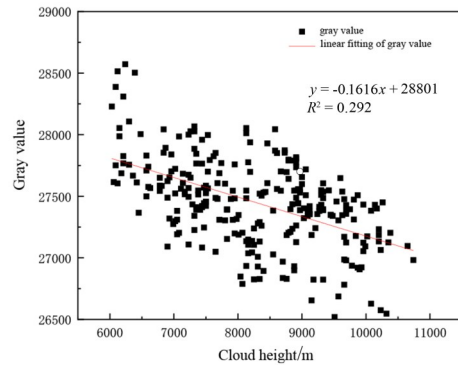


图7 6000 m以上的中、高云云高与灰度值散点图  
Fig. 7 Scatter plots of medium and high cloud height and gray value above 6000 m

通过以上分析,对6月所有有云数据进行简单质控,选取研究对象条件为:1)云高为2000 m以上,2)云层厚度较厚的云体。最终得到530组云高及灰度值数据进行相关性分析。在对北京南郊2019年6月数据分析以后,得到的相关系数明显提高,如图8所示。由图可知,随着云底高度的下降,其灰度值逐渐增大,两者满足线性关系。由于云底高与下行红外辐射之间的关系不仅与地区和云底高有关,还与大气水汽含量、季节差异有关,所以需要根据不同地点和季节分别统计拟合系数,例如本研究中的相关性仅适用于夏季。此外,在质控过程中,存在人为排除低云、薄云等云雷达和全天空红外成像仪观测不敏感的云层的环节,而云的现行分类中,常见的三族十属二十九类云是以云底高度、形态、形成过程等因素进行分类的,因此该相关性与云的类别密不可分。

为准确描述云底高度与云层灰度关系的线性变化, 采用一次线性函数对其进行回归分析。通过线性回归分析, 以 2019 年 8 月 12 日云层厚度较厚的天顶云为例, 反演得到新的云高, 与通过云雷达测得的实际云高进行比较, 结果如图 9 所示, 其中横坐标时序代表 12 日当天选取云层的时间序列, 两者相关系数为 0.956。由图可以看出, 在云层较厚、云底高度较低时, 反演云高与通过云雷达获取的实际云高更为贴近。

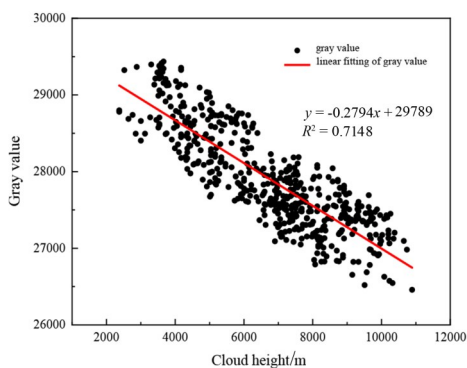


图 8 质控后 2019 年 6 月云高与灰度值散点图

Fig. 8 Scatter diagram of cloud height and gray value after quality control in June, 2019

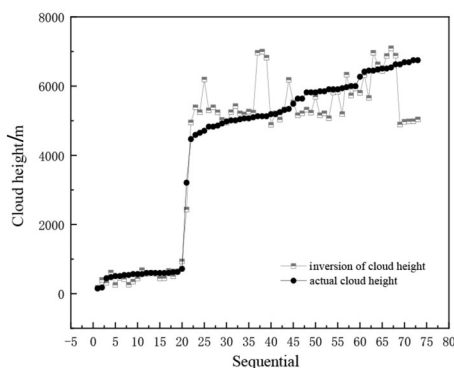


图 9 天顶方向实际云高与反演云高对比

Fig. 9 Comparison of actual and inversion cloud heights in zenith direction

### 2.2 非天顶位置的云底高度的反演

为初步探索云底高度和云红外辐射值之间的对应关系, 只考虑天顶附近大约 30°天顶角内红外辐射情况。取 2019 年 6 月 4 日红外云图上 30°天顶角的 10 × 10 个灰度点大小的范围 (图 10 的蓝色框内) 进行分析, 再利用回归方程得出该点云高。

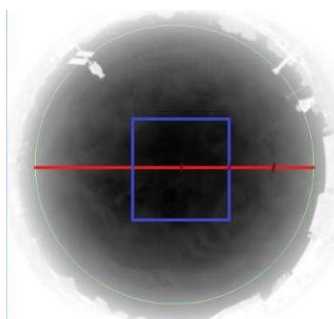


图 10 2019 年 6 月 4 日 07:30 天顶附近约 30°天顶角内区域

Fig. 10 The area within the zenith angle of about 30° near the zenith at 07:30 on June 4, 2019

取图 10 中天顶角 30°范围内红外云图的灰度值进行三维展示, 如图 11 所示。其中, 黑色、紫色、黄色、橙色平面分别代表天空无云、云高 7500 m、云高 3000 m 左右、云高 1000~2000 m 时的灰度值分布情况。由图可知, 随着云底高的增加, 地面所接收到的下行红外辐射则单调减小, 这为利用下行红外辐射对云高反演提供了基础。

根据辐射传输模式中内置的标准大气廓线 (包括热带、中纬度夏季、中纬度冬季、副极地夏季、副极地冬季及 us62 标准大气六种大气廓线), 通过太阳光谱、云参数、大气模型等参数进行一般性分析, 得到地面 8~

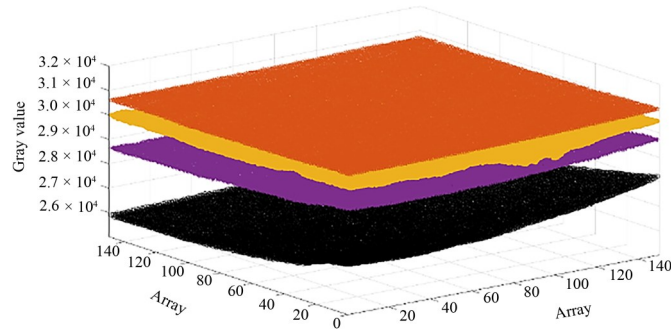


图 11 不同云高时红外云图30°天顶角范围内灰度值三维分布图

Fig. 11 Three-dimensional distribution of gray value within 30°zenith angle of infrared cloud image at different cloud heights

14 μm 波段向下红外辐射随天顶角的变化 (天顶角为辐射传输方向, 非观察方向), 结果如图 12 所示。由图可以看出, 8~14 μm 波段向下红外辐射均随天顶角的增加而增加, 在天顶附近大约 30°天顶角内, 向下红外辐射与天顶角余弦呈线性关系 [式 (1)], 超过天顶 70°以后, 向下红外辐射因受能见度、湿度等因素影响随天顶角余弦呈现非常复杂的非线性关系<sup>[13]</sup>, 本研究暂不考虑。

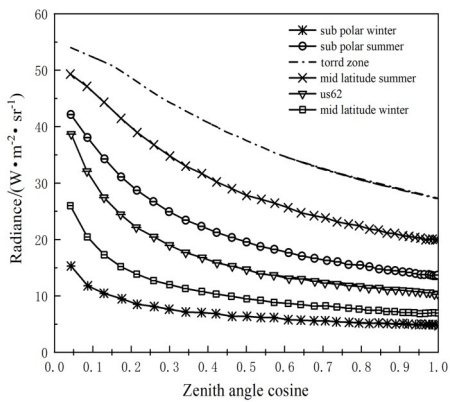


图 12 晴空向下红外辐射与天顶角余弦关系  
Fig. 12 Relationship between downward infrared radiation and zenith angle cosine in clear sky

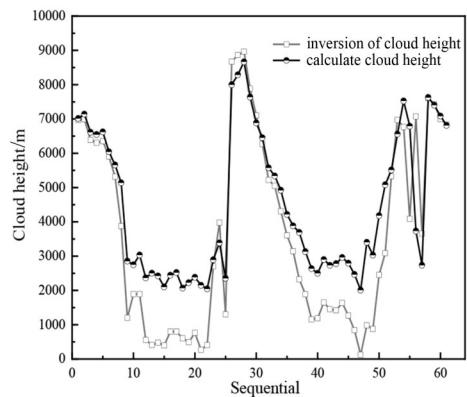


图 13 红外辐射与天顶角余弦呈线性关系反演得到的云高与取天顶附近约 30°天顶角得到的云高的比较  
Fig. 13 Comparison between the cloud height obtained by linear inversion of the relationship between infrared radiation and zenith angle cosine and the cloud height obtained taking the zenith angle of about 30° near zenith

利用向下红外辐射与天顶角余弦呈线性关系, 同样取角度为 30°天顶角, 通过线性关系得到新的灰度值, 再通过回归方程反演得到云高。

因本研究不涉及扫描式云雷达与激光测云仪, 故在非天顶方向的云高采用计算得出, 用以与反演云高做比较。其中反演云高均假设云层为均匀的, 最后得出的云高比较结果如图 13 所示。由图可知, 在云底高度较低时, 反演得到的云高与 30°天顶角得到的云高相较偏低, 两者相关系数为 0.9508, 考虑到反演得到的云高与实际云高不在天顶位置, 需要扫描式云雷达的对比验证结果。



### 3 结 论

对2019年6月双波段全天空成像仪和毫米波云雷达在中国气象局大气探测综合试验基地观测取得的云灰度值以及云底高数据进行了初步的反演分析,得到如下主要结论:

1) 毫米波云雷达获取的天顶云高,对比相同时刻红外云图天顶方向灰度值变化,可知有云时刻天顶灰度值较高。

2) 当云底高度高于2000 m,且云层厚度较厚时,云高与灰度值两者的相关性明显好于低云及云层较薄的云体。

3) 在个例分析中,以2019年8月12日的天顶云为例,通过线性回归反演云高与云雷达实测云高。结果表明在云层较厚,云底高度较低时,反演云高与实际云高更为贴近。两者相关系数达到0.956。

4) 红外辐射与天顶角余弦呈线性关系反演得到的云高较取天顶附近约 $30^\circ$ 天顶角得到的云高偏低,两者相关系数达到0.9508。

毫米波云雷达可以穿透云层,以高时空分辨率进行观测,并给出各层云的宏、微观信息,但在云底较低和近地面湿度较高时有明显的局限性,并且目前主要是对天顶方向进行单点观测,连续进行全天空扫描观测较为困难,且维护成本较大<sup>[15]</sup>。全天空红外成像仪观测的范围为全天空,可以同时给出云量和全天空云高的分布。

利用可见光/红外天空成像仪下行红外辐射和毫米波云雷达进行云底高度反演的准确度受许多因素的影响,除能见度外,还与大气水汽含量、季节差异有关。由于本研究仅对较为简单的状况进行讨论,下一步工作将进一步分析温度、湿度等对红外辐射的影响,得到更高精度的红外辐射与云底高度反演函数。并结合天顶角度与灰度值的关系,进一步反演全天空云高。

综上所述,各观测仪器在云参数观测方面都有其优势和局限性,若综合利用毫米波云雷达和双波段全天空成像仪的优点进行联合观测分析,能够大大有效提升云参数的观测精度,提高云高反演精度。

#### 参考文献:

- [1] Zhong L Z. *Calibration and Capability Analysis of China New Generation of Cloud Radar-HMBQ and Its Preliminary Application in Retrieving Cloud Microphysics Parameters* [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2009.  
仲凌志. 毫米波测云雷达系统的定标和探测能力分析及其在反演云微物理参数中的初步研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2009.
- [2] Stephens G L. Cloud feedbacks in the climate system: A critical review [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18 (2): 237-273.
- [3] Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al. *Atmospheric Physics* [M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 444-445  
盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 444-445.
- [4] Zong R, Guo W, Zhong L Z. Comparison analysis of cloud boundary detection by means of millimeter wavelength cloud radar and lidar [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(2): 171-177.  
宗蓉, 郭伟, 仲凌志. 毫米波雷达和激光雷达探测云边界的对比分析 [J]. 激光技术, 2016, 40(2): 171-177.

- [5] Li S T, Ma S Q, Gao Y C, *et al.* Comparative analysis of cloud base heights observed by cloud radar and ceilometer [J]. *Meteorological Monthly*, 2015, 41(2): 212-218.  
李思腾, 马舒庆, 高玉春, 等. 毫米波云雷达与激光云高仪观测数据对比分析 [J]. 气象, 2015, 41(2): 212-218.
- [6] Huang X Y, Hu H F, Bu L B, *et al.* Comparison and analysis of cloud base height measured by ceilometer, infrared cloud measuring system and cloud radar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, 30(1): 73-78.  
黄兴友, 夏俊荣, 卜令兵, 等. 云底高度的激光云高仪、红外测云仪以及云雷达观测对比分析 [J]. 量子电子学报, 2013, 30(1): 73-78.
- [7] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, *et al.* *Climate Change 2001: The Scientific Basis* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [8] Wang Z. *Comparative Analysis on Cloud Height Data Derived from a Ground-Based Millimeter-Wave Radar and Other Instruments* [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018.  
王喆. 基于地基毫米波雷达等多种资料的云高观测对比研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018年.
- [9] Tao F, Hu S Z, Zhang X F. Data fusion for base ground visible/infrared whole sky imager [J]. *Meteorological Monthly*, 2018, 44(4): 518-525.  
陶法, 胡树贞, 张雪芬. 地基可见光红外全天空成像仪数据融合 [J]. 气象, 2018, 44(4): 518-525.
- [10] Peng L. *Comprehensive Analysis and Research on Observation Data of ARM Cloud Radar and Other Related Instruments* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011.  
彭亮. ARM云雷达及其他相关仪器观测资料综合分析研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2011.
- [11] Tang Y J, Ma S Q, Yang L, *et al.* Observation and comparison of cloud-base heights by ground-based millimeter-wave cloud radar [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015, 26(6): 680-687.  
唐英杰, 马舒庆, 杨玲, 等. 云底高度的地基毫米波云雷达观测及对比 [J]. 应用气象学报, 2015, 26(6): 680-687.
- [12] Hu S Z. *Ground-based Infrared Measurements of Cloud Systems and Applications Research* [D]. Chengdu: Chengdu University of Information Engineering, 2012.  
胡树贞. 地基红外测云系统和应用研究 [D]. 成都: 成都信息工程学院, 2012.
- [13] Sun X J. *Study on Ground-Based All-Sky Infrared Remote Sensing of Clouds* [D]. Beijing: Peking University, 2009.  
孙学金. 云的地基全天空红外遥感研究 [D]. 北京: 北京大学, 2009.
- [14] Zhong L Z, Liu L P, Ge R S. Characteristics about the millimeter-wavelength radar and its status and prospect in and abroad [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(4): 383-391.  
仲凌志, 刘黎平, 葛润生. 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, 2009, 24(4): 383-391.
- [15] Zhang W X, Lü D R. Comparison of cloud base heights by ground based sky IR brightness temperature measurements with cloud radar and ceilometer in Shouxian [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, 36(4): 657-672.  
章文星, 吕达仁. 地基热红外云高观测与云雷达及激光云高仪的相互对比 [J]. 大气科学, 2012, 36(4): 657-672.
- [16] Chen L, Shi P F, Han Y, *et al.* Analysis of atmospheric downward infrared radiation characteristics in the Bosten Lake Area and application in all-sky cloud identification [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2014, 8(1): 39-44.  
陈磊, 石鹏飞, 韩燕, 等. 新疆博湖地区大气向下红外辐射特性及其对云识别应用的研究 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(1): 39-44.