

胡树贞,曹晓钟,陶法,等,2020. 船载毫米波云雷达观测西太平洋云宏观特征对比分析[J]. 气象,46(6):745-752. Hu S Z, Cao X Z, Tao F, et al, 2020. Comparative analysis of cloud macro characteristics from two shipborne millimeter wave cloud radars in the West Pacific[J]. Meteor Mon, 46(6):745-752(in Chinese).

## 船载毫米波云雷达观测西太平洋云宏观特征对比分析\*

胡树贞<sup>1</sup> 曹晓钟<sup>1</sup> 陶法<sup>1,2</sup> 张雪芬<sup>1</sup>

1 中国气象局气象探测中心,北京 100081

2 南京信息工程大学,南京 210044

**提 要:** 2017 年 10 月 15 日至 11 月 15 日,利用“科学”号海洋科学综合考察船安装的两部型号云雷达(HT101、HMBKPS)开展西太平洋云观测试验研究。试验期间定时释放探空仪,利用探空仪的出云及入云高度,开展云雷达云高准确性分析;同船安装一台可见光 & 热红外双波段天空成像仪获取天顶图像,分析云雷达数据获取率。试验结果表明:两部云雷达云高数据一致性较好,探测云底高度相关系数为 0.997,云顶高度相关系数为 0.988;云雷达探测云高准确性高,与基于探空识别的云底高度平均偏差分别为 130 m(HT101)、72 m(HMBKPS),云顶高度平均偏差分别为 310 m(HT101)、190 m(HMBKPS);受海洋性气候及船体摇摆影响,两部云雷达云数据获取率分别为 57.8%(HT101)、68.7%(HMBKPS),漏测主要为卷云和淡积云。

**关键词:** 毫米波云雷达,云,探空系统,西太平洋

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.06.002

## Comparative Analysis of Cloud Macro Characteristics from Two Shipborne Millimeter Wave Cloud Radars in the West Pacific

HU Shuzhen<sup>1</sup> CAO Xiaozhong<sup>1</sup> TAO Fa<sup>1,2</sup> ZHANG Xuefen<sup>1</sup>

1 CMA Meteorological Observation Center, Beijing 100081

2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** From 15 October to 15 November 2017, two types of millimeter wave cloud radar (MMCR) (HT101, HMBKPS) installed on the “Science” marine science research ship were used for cloud observation in the West Pacific. Sounding balloons were released periodically during the observation; the accuracy of MMCR was analyzed according to the height of sounding out of cloud and into cloud. A visible light and thermal infrared dual-band sky imager was also installed on the ship to obtain 24 h zenith image and MMCR data acquisition rate was analyzed by these images. The test results show that the data of two radars were highly consistent, the cloud base height correlation coefficient was 0.997, and cloud top height correlation coefficient was 0.988. The accuracy of cloud height observation by two types of MMCR was high; the average deviations of cloud base height between sounding and MMCR were 130 m (HT101) and 72 m (HMBKPS); the average deviations of cloud top height between sounding and MMCR were 310 m (HT101) and 190 m (HMBKPS), respectively. Affected by maritime climate and ship swaying, the cloud data acquisition rates of the two MMCR were 57.8% (HT101) and 68.7% (HMBKPS), respectively, and the missed clouds were mainly cirrus and cumulus clouds.

**Key words:** millimeter wave cloud radar (MMCR), cloud, sounding system, West Pacific

\* 国家自然科学基金重点项目(61531019)和国家重点研发计划(2017YFC1501700)共同资助

2019 年 4 月 25 日收稿; 2019 年 10 月 17 日收修定稿

第一作者:胡树贞,主要从事地面观测自动化研究. Email:052310421hu@163.com

## 引 言

云是地球大气辐射收支平衡的主要调节者,云的年季节变化对于研究全球气候变化以及水汽收支平衡具有重要意义,在气象业务中对云观测资料需求较为迫切(Cess et al, 1989; 胡树贞等, 2013)。其中,在天气预报中,云观测资料主要用于明确天气状况,判别天气系统类型、覆盖范围、移动和强弱等;在人工影响天气中,主要应用于作业条件识别、作业追踪指挥和作业效果评估等;另外,热带地区海上的低云反馈,已被确定为气候敏感性模型估计中不确定性的主要来源。

目前,云遥感探测设备主要包括激光云高仪、毫米波云雷达、红外和可见光测云仪等。对它们的测云能力,国内外专家学者进行了评估与对比分析(Lhermitte, 1987; Hollars et al, 2004; 赵静等, 2017; 黄兴友等, 2013; 胡树贞等, 2017; 陶法等, 2018; 李思腾等, 2015; Wang et al, 2018; 丁虹鑫等, 2018),并在气象业务中开展了实际应用。

海洋约占全球面积的 71%,海洋与陆地之间的水汽交换是决定全球气候变化的主要因素之一。对海上云的观测目前主要以卫星观测为主(卢乃锰等, 2017), Aqua 卫星和 CloudSat 卫星是目前全球云监测的主要数据来源(谢磊和刘奇, 2017; 高洋和方翔, 2018),研究人员利用 Aqua 卫星开发了云顶温度、光学厚度、云滴有效半径、云水路径等观测产品, CloudSat 卫星携带云廓线雷达,可以探测 -30 dBz 信号强度垂直云廓线,提高了人类对云层内部结构的认识。卫星上携带的主被动遥感设备的相互补充联合应用,使人们可以更加充分了解云以及气溶胶的时空分布,定量化云和气溶胶辐射效应(李积明等, 2009)。

另外,国内外专家学者也开展了基于船载的海基云观测试验。例如,利用船载双通道(1.35 cm 和 8.6 mm)微波辐射计开展西太平洋热带海域水汽和云中液态水含量的统计研究(魏重等, 1989),利用 95 GHz 云雷达/激光雷达数据分析热带西太平洋地区云的垂直结构、冰云有效半径及冰水含量的垂直分布,并结合国际卫星云气候学计划(ISCCP)开展天气特征与云粒子垂直速度的分析研究(Sato et al, 2010; Okamoto et al, 2008)。

本文主要利用“科学”号海洋科学综合考察船搭载的云观测设备进行分析,具体为利用探空数据对科考期间海洋大气特性进行分析,对两部云雷达观测性能、探测一致性及数据捕获能力等方面进行对比分析,为后续发展海基云观测提供参考。

## 1 观测试验及设备简介

为获取西太平洋上空云特性,验证船载条件下云雷达在海洋性气候中的探测性能,2017年10月15日至11月15日,利用中国科学院海洋研究所“科学”号海洋科学综合考察船,搭载两种型号 Ka 波段云雷达(HT101、HMBKPS)开展西太平洋海域云观测试验研究。为配合此次海上云观测试验,利用 GPS 探空仪每天 08 时和 16 时(北京时,下同)定时两次探空,有云时刻 12 时加密观测。同船安装一台可见光 & 近红外双波段天空成像仪,每 10 min 获取 1 张全天空可见光波段图像和天顶方向热红外图像。

两部云雷达和天空成像仪安装在考察船顶层甲板,彼此间距小于 10 m,高度落差小于 3 m。两部雷达均垂直天顶进行观测,尽可能确保探测对象一致。云雷达主要性能指标见表 1,“科学”号走航路径及设备安装情况见图 1。

“科学”号走航期间,两部云雷达和天空成像仪整体运行状态良好,试验人员定期和较大天气过程后开展雷达天线罩和天空成像仪的设备维护工作,未发生数据丢失情况。试验期间共获取 58 组有效探空样本,且在放球时刻记录天气现象。

## 2 科考期间海洋大气特性分析

为获取“科学”号走航期间海上天气特征,利用随船释放探空仪获取大气垂直廓线数据,结合云雷达获取的云信息进行海洋大气特性分析。为避免不同纬度地区天气气候存在明显区域特征,仅统计“科学”号在 15°~2°N 区间航行数据。期间共获取 37 组探空样本,由于探空气球升限不同,为统一仅统计海平面至高空 20 km 的数据。图 2 为探空样本的温度、湿度、风速、风向随高度分布图,横坐标为探空仪释放日期(根据天空状况,平均每天 2~3 次探空),最后一列柱状图为所有样本均值。

表 1 毫米波云雷达系统主要指标

Table 1 Main indicators of millimeter wave cloud radar (MMCR)			
系统部件	参数/单位	HT101	HMBKPS
天线	直径/m	1.6	1.4
	增益/dB	$\geq 53$	$\geq 52.5$
	波束宽度/ $^{\circ}$	$\leq 0.4$	$\leq 0.4$
	工作模式	垂直天顶、水平极化	垂直天顶、水平极化
发射机	频段	Ka	Ka
	峰值功率/W	11.8	32
	脉冲宽度/ $\mu\text{s}$	1,5,20	0.2,8,24
	脉冲重复频率/Hz	6 500	8 333~16 667
接收机	线性动态范围/dB	87	82
	噪声系数/dB	5.3	4.5
	增益/dB	35	52
信号处理系统	观测产品	Z,V,W,CBH,CTH	Z,V,W,CBH,CTH
	产品分辨率/S	60	60
	处理方法	FFT	FFT
	库长/m	30	30
整机系统	系统最小可测信号功率/dBm	-110	-112

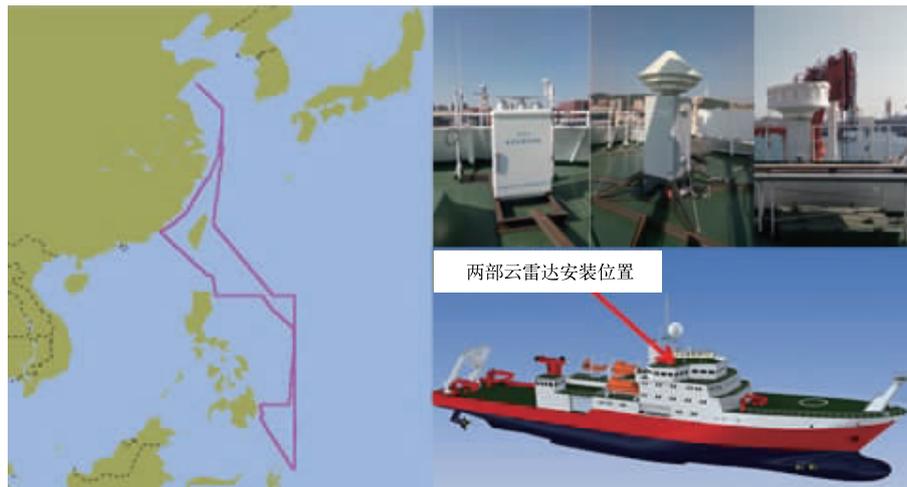


图 1 2017 年 10 月 15 日至 11 月 15 日观测试验期间走航路径及设备安装示意图

Fig. 1 Track of cruise and installation of equipment during the observation from 15 October to 15 November 2017

从图 2a 大气温度廓线图中可得出, 试验期间西太平洋低纬度地区大气垂直温度稳定, 零度层平均高度为 5.1 km, 对流层顶高为 17 km。图 2b 湿度廓线图中该海域大气湿度较大, 平均相对湿度 60% 所处高度为 10.6 km。图 2c 风速廓线图中, 试验期间垂直大气风速较小, 10 km 以下各海拔高度处的风速均值小于  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 图 2d 显示风向主要以偏北风为主。

图 3 为“科学”号走航期间(10 月 15 日至 11 月 15 日)云雷达反射率因子随时间的演变, 海上云以对流云和卷云为主, 有天气过程时刻云体发展旺盛,

云顶高度达 10 km 以上。

### 3 云雷达探测一致性分析

“科学”号走航期间船速约为  $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , 由于云具有移动速度, 两部雷达虽然安装距离近, 但由于探测性能和信号处理方式不同, 不可避免会存在探测差异, 为验证两部云雷达探测一致性, 本节从个例和统计两个角度加以分析。

选取 2017 年 11 月 8 日观测数据进行个例分析, 图 4 为云雷达反射率因子和径向速度随时间变

化的 THI 图像,其中接地时刻为降水。因两部云雷达厂家给出的库长和时间分辨率相同,可利用探测到有云距离库的数量,分析二者的探测性能。11月8日全天 HT101 与 HMBKPS 探测有云距离库数目分别为 163 924 个和 187 620 个,整体上两部云雷达探测的云体结构和形态较为一致,由于云雷达性能稍有不同,HMBKPS 在云体边界上探测敏感性更高。

对整个试验期间两部雷达探测的云高数据进行相关性分析,由于天顶同一时刻会存在多层云现象,

另外海洋上底层云的云体变化较快,为使两部云雷达探测云体准确对应,本文只对最低一层云的云底高度和最高一层云的云顶高度进行分析。图 5 为两部云雷达探测云底高度(CBH)和云顶高度(CTH)相关性分析,两部雷达间 CBH 相关系数  $R=0.997$ ,所有样本均值 HMBKPS 偏低 60 m,CTH 相关系数  $R=0.988$ ,HMBKPS 平均偏高 451 m。统计结果显示,HMBKPS 探测云层较厚,与 11 月 8 日个例分析结果吻合。

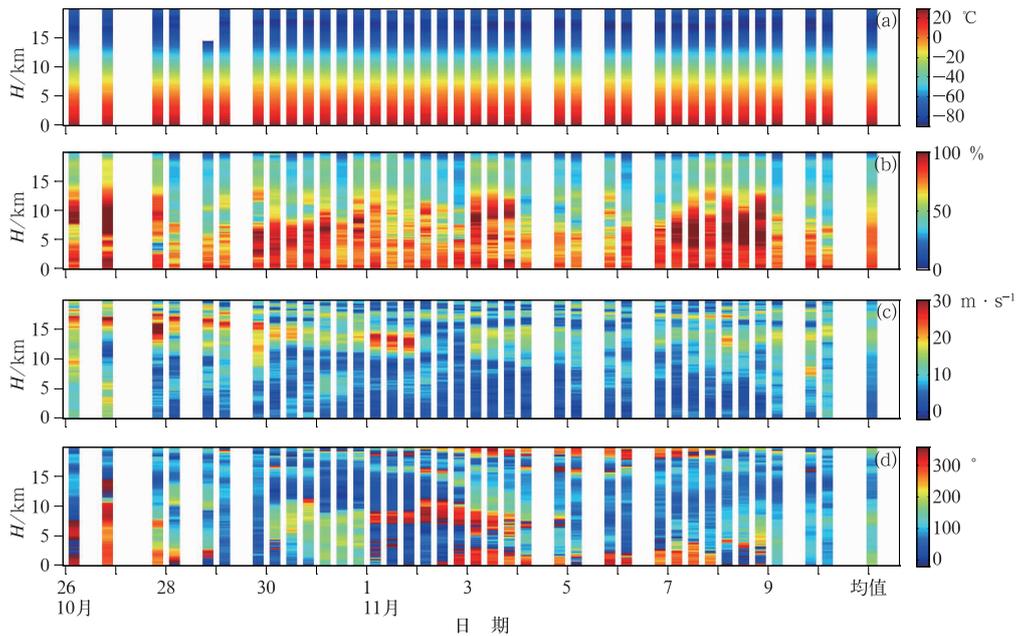


图 2 2017 年 10 月 26 日至 11 月 10 日探空气象要素随高度演变  
(a)温度,(b)湿度,(c)风速,(d)风向

Fig. 2 Sounding meteorological elements evolving with altitude from 26 October to 10 November 2017  
(a) temperature, (b) humidity, (c) wind speed, (d) wind direction

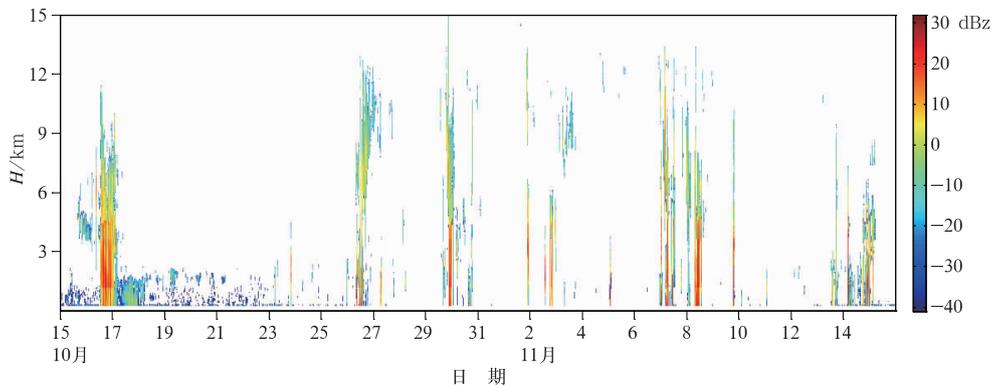


图 3 2017 年 10 月 15 日至 11 月 15 日云雷达反射率因子时间-高度剖面

Fig. 3 Time-height profile of reflectivity factor by MMCR from 15 October to 15 November 2017

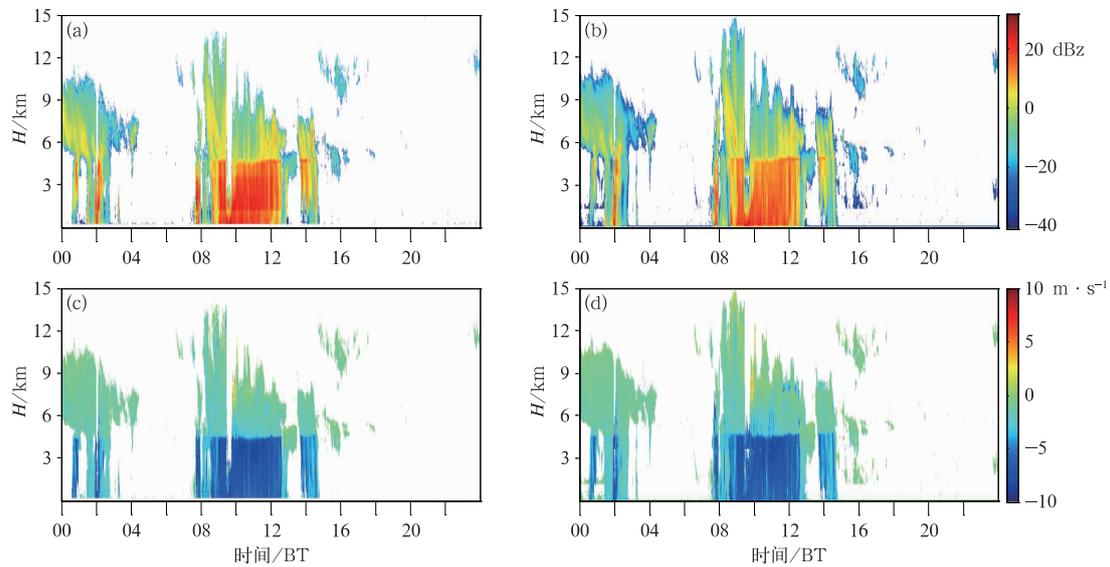


图 4 2017 年 11 月 8 日云雷达 HT101(a,c),HMBKPS(b,d)的反射率因子(a,b)和径向速度(c,d)的时间-高度剖面  
 Fig. 4 Time-height profiles of reflectivity factor (a, b) and radial velocity (c, d) by MMCR on 8 November 2017  
 (a, c) HT101, (b, d) HMBKPS

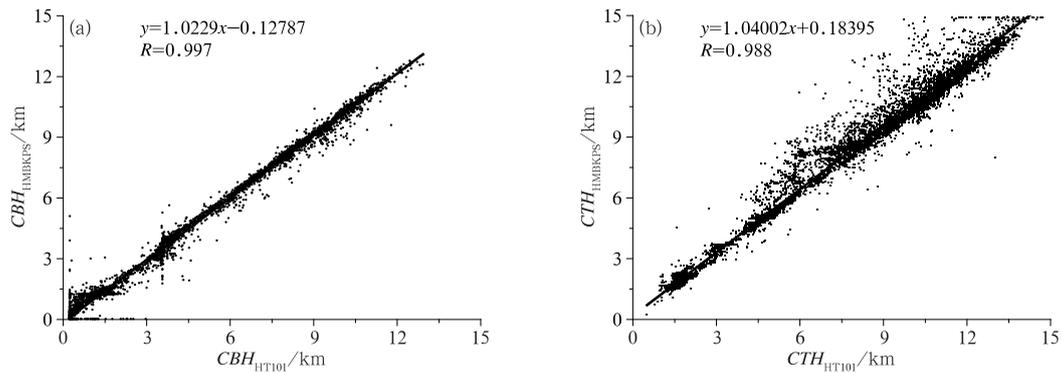


图 5 HT101 和 HMBKPS 两部云雷达观测的 CBH(a)和 CTH(b)相关性分析  
 Fig. 5 CBH (a) and CTH (b) correlation analysis by HT101 and HMBKPS MMCRs

从个例和统计分析两个方面分析了两部云雷达在云宏观结构等方面差异,结果显示两部云雷达能够获得一致的云宏观结构特征。

#### 4 基于探空数据的云雷达探测性能分析

本节利用基于探空温度和湿度阈值的云判别方法(周毓荃和欧建军,2010;Poore et al,1995),结合云类、天气现象等信息进行综合分析,把探空仪入云和出云对应的高度作为标准云高,试验期间对于一次探空出现多层云情况,每层云作为独立样本进行统计。走航期间 58 组探空廓线有效识别到 45 个云

底和 28 个云顶样本,对应探空能够识别出云体的样本时次,两部雷达都分别获取了 23 个云底样本和 16 个云顶样本。

由于云、云雷达、探空仪三者同时在移动,其中探空仪和云的移动方向一致,可以部分抵消探空仪升空时间与云雷达测量的不对应性。为使云雷达和探空能够相对准确地测量同一云体的云高数据,本文对探空仪释放时刻前后 10 min 内云雷达观测云高数据进行取平均处理,作为对应的云高数据。

图 6 为两部云雷达探测云高与探空识别云高样本折线图,可看出云雷达所测云高与探空识别云高趋势一致。其中,HT101 探测的 CBH 平均偏高 130 m, HMBKPS 平均偏高 72 m;相对于探空

HT101 探测的 CTH 平均偏低 310 m, HMBKPS 平均偏低 190 m。整体上两部云雷达探测的云体高度与探空识别云体高度偏差较小, 船载状况下云雷达仍能有效获取天顶云层信息。另外, 探空与云雷达之间偏差产生的原因可能为: (1) 云雷达与探空仪廓线识别云体机理不同, 造成彼此间云高存在偏差; (2) 探空仪湿度传感器在低温状态下出云时脱湿滞后, 造成云顶偏高; (3) 云、云雷达、探空仪同时移动, 二者探测云体(对象)不同, 造成探测数据偏差; (4) 云雷达性能参数和信号处理方法不同, 导致数据偏差。

### 5 云雷达数据捕获能力分析

利用此次海上云观测试验携带的可见光 & 热红外双波段天空成像仪, 根据天顶有云和无云时的辐射特性, 结合可见光成像仪拍摄图片, 以人工判别方式获取天顶云特征, 进而统计两部云雷达对于海洋上空云观测数据的获取情况。图 7 为不同天气条件下热红外成像仪拍摄的垂直天顶图像, 表 2 为走航试验期间云雷达数据获取情况。

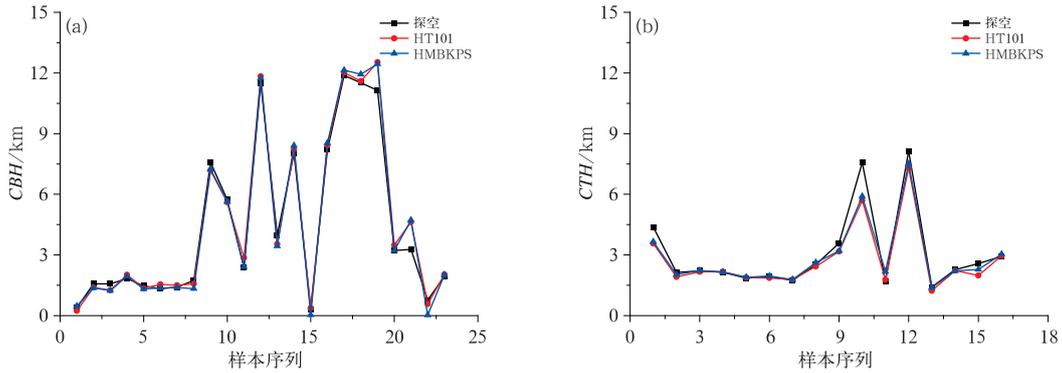


图 6 云雷达与探空云高分析  
(a)CBH, (b)CTH

Fig. 6 Analysis of cloud height by MMCR and sounding  
(a) CBH, (b) CTH

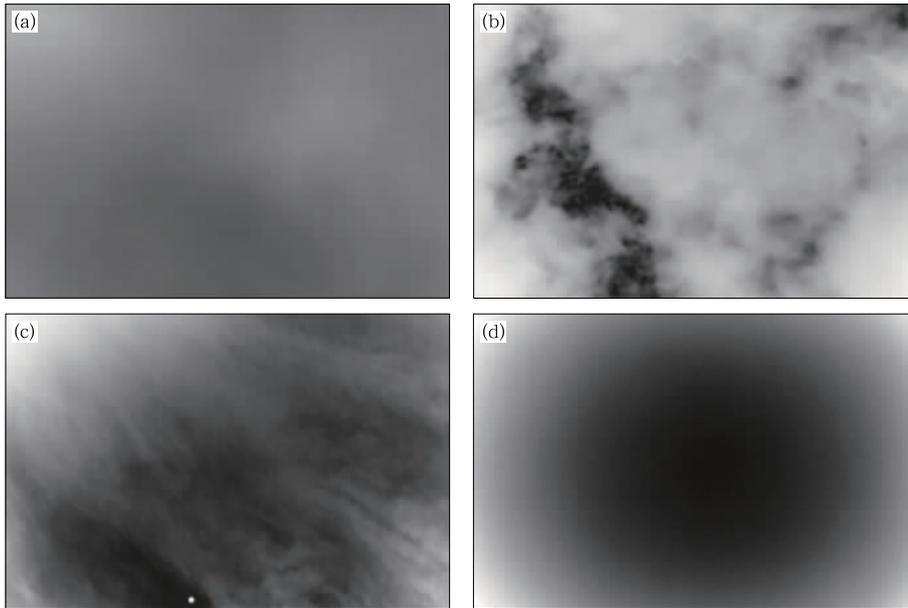


图 7 不同天气条件下天顶热红外图像  
(a)降雨, (b)积云, (c)卷云, (d)晴空

Fig. 7 Infrared images of zenith under different weather conditions  
(a) rainfall, (b) cumulus, (c) cirrus, (d) clear sky

表2 试验期间云雷达的云数据获取率统计  
Table 2 Cloud data acquisition rate statistics  
of MMCR during observation

测云设备	设备有云样本数/个	图片中有云样本数/个	获取率/%
HT101	15 395	26 655	57.8
HMBKPS	18 306	26 655	68.7

图7显示,不同天气条件下热红外云图可明显确定天顶状况,统计出两部云雷达云数据获取率分别为57.8%和68.7%。云雷达漏测主要为卷云和积云,同时卷云和积云也是此次走航试验期间天空最主要的云类。造成云雷达卷云漏测的主要原因是,为尽量减少船体晃动对云雷达探测造成影响,两部云雷达积分时间设置时间较短;另一个可能原因是,两部云雷达云顶高度主要集中在6 km以上,固态体制的云雷达功率小,回波信号弱,探测能力有限。对于积云漏测的主要原因是海洋上空积云主要以淡积云和浓积云为主,此类云最主要的特点是云体小、高度低、移动速度快,云雷达不易探测。需要说明的是,海洋上空稀薄卷云由于高度和密实程度等原因,此类情况热红外云图并不能完全有效进行天空状况的判别,特别是在没有可见光成像仪辅助判别的夜间,两部云雷达云数据捕获率可能会更低。

## 6 结 论

利用“科学”号海洋综合考察船上安装的两部不同型号毫米波云雷达、双波段天空成像仪以及GPS探空系统,在西太平洋低纬度地区开展走航云观测试验,经对比分析,得到以下结论:

(1)船载条件下,通过不同型号毫米波云雷达观测数据对比分析,两部云雷达可有效获取走航期间海洋上空云的宏观结构,且观测结果一致性较好。

(2)通过云雷达观测数据与探空识别的云高数据进行对比分析,毫米波云雷达在船载条件下探测云层高度准确性较高。

(3)通过船载安装的天空成像仪统计分析,走航期间西太平洋低纬度地区主要以卷云和积云为主,毫米波云雷达漏测率较高,需要进一步完善信号处理算法。

(4)综合分析,云雷达的峰值功率越高和系统最小可测信号越小,将更有利于船载条件下海洋云观测。

**致谢:**感谢国家自然科学基金委开放共享航次和中国科学

院海洋研究所“科学”号海洋科学综合考察船提供海上测试平台。

## 参考文献

- 丁虹鑫,马舒庆,杨玲,等,2018.云雷达和微波辐射计联合反演大气湿度廓线的初步研究[J].气象,44(12):1604-1611. Ding H X, Ma S Q, Yang L, et al, 2018. Retrieval of humidity profiles by using cloud radar and microwave radiometer[J]. Meteor Mon, 44(12):1604-1611(in Chinese).
- 高洋,方翔,2018.基于CloudSat卫星分析西太平洋台风云系的垂直结构及其微物理特征[J].气象,44(5):597-611. Gao Y, Fang X, 2018. Analyses on vertical structure and microphysical features of typhoon cloud in western Pacific based on CloudSat satellite data[J]. Meteor Mon, 44(5):597-611(in Chinese).
- 胡树贞,马舒庆,陶法,等,2013.基于红外实时阈值的全天空云量观测[J].应用气象学报,24(2):179-188. Hu S Z, Ma S Q, Tao F, et al, 2013. An experiment study of all-sky cloud amount observation based on infrared real-time threshold[J]. J Appl Meteor Sci, 24(2):179-188(in Chinese).
- 胡树贞,陶法,马舒庆,等,2017.地基主动式云自动观测设备外场对比试验[J].气象科技,45(6):988-994. Hu S Z, Tao F, Ma S Q, et al, 2017. Field comparative experiment of active automatic cloud observation equipment[J]. Meteor Sci Technol, 45(6):988-994(in Chinese).
- 黄兴友,夏俊荣,卜令兵,等,2013.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,30(1):73-78. Huang X Y, Xia J R, Bu L B, et al, 2013. Comparison and analysis of cloud base height measured by ceilometer, infrared cloud measuring system and cloud radar[J]. Chin J Quantum Electron, 30(1):73-78(in Chinese).
- 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 J M, Huang J P, Yi Y H, et al, 2009. Analysis of vertical distribution of cloud in East Asia by space-based lidar data[J]. Chin J Atmos Sci, 33(4):698-707(in Chinese).
- 李思腾,马舒庆,高玉春,等,2015.毫米波云雷达与激光云高仪观测数据对比分析[J].气象,41(2):212-218. Li S T, Ma S Q, Gao Y C, et al, 2015. Comparative analysis of cloud base heights observed by cloud radar and ceilometer[J]. Meteor Mon, 41(2):212-218(in Chinese).
- 卢乃锰,方翔,刘健,等,2017.气象卫星的云观测[J].气象,43(3):257-267. Lu N M, Fang X, Liu J, et al, 2017. Understanding clouds by meteorological satellite[J]. Meteor Mon, 43(3):257-267(in Chinese).
- 陶法,胡树贞,张雪芬,2018.地基可见光/红外全天空成像仪数据融合[J].气象,44(4):518-525. Tao F, Hu S Z, Zhang X F, 2018. Data fusion for base ground visible/infrared whole sky imager[J]. Meteor Mon, 44(4):518-525(in Chinese).
- 魏重,忻妙新,林海,等,1989.西太平洋热带海域水汽和云中液态水含量的统计特征[J].大气科学,13(2):199-203. Wei Z, Xin M

- X, Lin H, et al, 1989. The statistical properties of precipitable water and liquid water content in cloud over West Pacific tropical area[J]. *Sci Atmos Sin*, 13(2):199-203(in Chinese).
- 谢磊, 刘奇, 2017. 基于卫星遥感的全球洋面降水暖云与非降水暖云的云参数差异[J]. *中国科学技术大学学报*, 47(12):1006-1014.
- Xie L, Liu Q, 2017. Cloud property differences between precipitating and non-precipitating warm clouds over global oceans derived from satellite remote sensing[J]. *J Univ Sci Technol China*, 47(12):1006-1014(in Chinese).
- 赵静, 曹晓钟, 代桃高, 等, 2017. 毫米波云雷达与探空测云数据对比分析[J]. *气象*, 43(1):101-107. Zhao J, Cao X Z, Dai T G, et al, 2017. Comparative analysis of cloud observed by millimeter wave cloud radar and sounding[J]. *Meteor Mon*, 43(1):101-107 (in Chinese).
- 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 Y Q, Ou J J, 2010. The method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research[J]. *Meteor Mon*, 36(11):50-58(in Chinese).
- Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, et al, 1989. Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models[J]. *Science*, 245(4917):513-516.
- Hollars S, Fu Q, Comstock J, et al, 2004. Comparison of cloud-top height retrievals from ground-based 35 GHz MMCR and GMS-5 satellite observations at ARM TWP Manus site[J]. *Atmos Res*, 72(1-4):169-186.
- Lhermitte R, 1987. A 94-GHz Doppler radar for cloud observations [J]. *J Atmos Ocean Technol*, 4(1):36-48.
- Okamoto H, Nishizawa T, Takemura T, et al, 2008. Vertical cloud properties in the tropical western Pacific Ocean: validation of the CCSR/NIES/FRCGC GCM by shipborne radar and lidar[J]. *J Geophys Res Atmos*, 113(D24):D24213.
- 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.
- Sato K, Okamoto H, Takemura T, et al, 2010. Characterization of ice cloud properties obtained by shipborne radar/lidar over the tropical western Pacific Ocean for evaluation of an atmospheric general circulation model[J]. *J Geophys Res Atmos*, 115(D15):D15203.
- Wang Z, Wang Z H, Cao X Z, et al, 2018. Cloud-base height derived from a ground-based infrared sensor and a comparison with a collocated cloud radar[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 35(4):689-704.