霍娟, 吕达仁, 段树, 等. 2020. 基于2014～2017年Ka毫米波雷达数据分析北京地区云宏观分布特征 [J]. 气候与环境研究, 25(1): 45−54. HUO Juan, LÜ Daren, DUAN Shu, et al. 2020. Cloud Macro-Physical Characteristics in Beijing Based on Ka Radar Data during 2014-2017 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25(1): 45−54. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18084

基于2014～2017年Ka毫米波雷达数据分析北京地区云宏观分布特征

霍娟　吕达仁　段树　毕永恒

中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测开发重点实验室，北京 100029

摘　要　本文利用2014年1月至2017年12月Ka毫米波雷达数据对北京地区云宏观特征进行统计分析。云出现率方面，4年平均值约36.3%；冬季最低，夏季最大；月出现率值9月最大，12月最小；出现率日变化有季节差异，春夏两季呈现中午（11:00，北京时间，下同）开始逐步升高至下午17:00后逐步下降的特点，增高幅度大于15%；冬、秋两季日变化特征不显著。高度方面，4年平均云底高约4.9 km，平均云顶高约7.2 km；云顶高和云底高的月变化特征明显，从年初1月开始逐步上升，在6月达到峰值，而后下降到12月达到低值；3～10月，高云（云底高>5 km)占约一半左右比例；厚度小于1 km的云在各月中所占比例最高；厚度1～4 km的云，厚度越大所占比例越低；特别地，厚度大于4 km的云所占比例在4～9月中仅次于厚度小于1 km云的比例。4年期间，北京地区单层云居多约占66.7%，两层云占比约25.2%，两层以上云占8.1%；冬季约80%的云为单层云，而6～9月云层分布变化最多，其中9月单层云比例最低约为40%。本文基于4年高时空分辨率雷达数据对北京地区云分布特征，特别是云垂直分布特征在数值上准确刻画，该项工作在已有云气候研究中尚未见开展，所获得的知识将对了解地区气候特征、区域模式云参数化选择提供参考。

关键词　Ka毫米波雷达　云　云出现率　云高

文章编号　1006-9585(2020)01-0045-10　　**中图分类号**　P413　　**文献标识码**　A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18084

Cloud Macro-Physical Characteristics in Beijing Based on Ka Radar Data during 2014−2017

HUO Juan, LÜ Daren, DUAN Shu, and BI Yongheng

Key Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, *Institute of Atmospheric Physics*, *Beijing* 100029

Abstract　In this paper, Ka band radar data from January 2014 to December 2017 are used to statistically analyze the macro-physical characteristics of cloud in Beijing. The average cloud occurrence frequency during the four years is 36.3%. The maximum monthly averaged cloud occurrence frequency occurs in September, and the minimum is in December. Cloud occurrence frequency has significant daily variation in spring and summer, increasing by up to 15% from 1100 LST to 1700 LST and then decreasing gradually. The mean cloud base height (CBH) is 4.9 km, and cloud top height (CTH) is 7.2 km. The CBH and CTH rise from January gradually, reach the peak in June, and fall to minimum in December. From March to October, high-level clouds (CBH ＞ 5 km) account for 50% of all clouds. Clouds with cloud thickness (CT) ＜ 1 km are the majority in each month; from April to September, clouds with CT ＞ 4 km account for the

收稿日期　2018-06-28；**网络预出版日期**　2019-04-04

作者简介　霍娟，女，1977年出生，博士，副研究员，主要从事云相关遥感与辐射研究。E-mail: huojuan@mail.iap.ac.cn

资助项目　国家自然科学基金项目41775032

Funded by　National Natural Science Foundation of China (Grant 41775032)

second-top proportion. Statistics show that single-layer clouds account for 66.7%, double-layers clouds account for 25.2%, and 8.1% are multiple-layers clouds. About 80% of clouds are single-layer in winter. The climatological characteristics, especially the vertical distribution of clouds in Beijing, are characterized numerically based on radar data in high temporal and spatial resolution. Results from this work will further clarify regional cloud climatic characteristics as well as cloud parameterization in climate models.

Keywords Ka radar, Cloud, Occurrence frequency, Cloud height

1 引言

云的生成和发展与大气过程密切相关，且云对大气长波、短波辐射传输产生影响。云特征参数（如云量、云高和云水含量等）的变化，可能会对地区天气或气候产生影响，反之，气候及天气的变化也会引起云分布特征的改变。在气候模式开发与研究中，尚无法准确细致描述云特征参数，云参数化问题目前依然是气候模式研究的重要课题。

正因为云在地球气候系统辐射能量收支、水份循环以及天气气候模式模拟中起着重要的作用，一直以来，针对全球或区域云及其分布特征的研究开展较多。其中，由于ISCCP （International Satellite Cloud Climatology Project，国际卫星云气候计划）云资料数据集提供了比较系统、覆盖全球且质量相对较好的云数据资料，从发布一开始就在云气候特征研究中得到广泛应用（Rossow and Schiffer, 1991, 1999; Rossow et al., 1993; 刘洪利等，2003；丁守国等，2005）；也有利用地面长期气象台站数据、或其他独立卫星云资料数据（如风云系列卫星）来开展地区云气候特征研究（翁笃鸣和韩爱梅，1998；Pfister et al., 2003; 方宗义等，2004）。这些工作较多地围绕云量开展气候分布特征及演变研究。随着星载雷达数据的发布（CloudSat和CALIPSO），针对全球或地区的云结构特征的一些研究工作也陆续开展（Sassen et al., 2008; Adhikari et al., 2012; 霍娟，2015）。这些研究结果表明云的分布具有显著的区域性差异，如海陆之间差异明显，在热带、中纬度带、高纬度带之间云特征分布差异也显著。北京，中国首都，位于华北平原北部，受所处地理位置、地形等多种因素的影响，该区域云的特征及其产生的降水具有相当的区域代表性与实际重要性。

对区域性云分布特征研究而言，地面台站人工观测云资料主观性强；卫星探测云资料空间范围广并可提供云的多种物理信息，但卫星数据时空分辨率低，基于被动遥感方法的云资料数据不利于获得准确的云体结构特征。地面雷达云探测资料具有较高的时空分辨率，并且具有监测云体垂直结构特征的能力，使用雷达资料开展云的天气气候特征分析具有优越性和独特性。但受探测技术、设备性能和经费等诸多因素的影响，地基雷达开展长时间连续观测的条件常常受到限制。2010年，中国科学院大气物理研究所实验楼顶架设一部Ka毫米波雷达，经过2年多时间的调测调试，自2012年年底观测性能保持稳定，开始了每天24 h连续观测模式并延续至今。到目前，地基Ka毫米波雷达连续积累的观测时长在国内乃至国际亦不多见，在此期间获取的云观测数据，为研究地区云属性特征及演变、开展云属性探测天地基对比，开展地基雷达数据云参数反演研究等提供了非常宝贵的数据资源。

作为系统研究工作的开始和一部分，本文工作选用2014年1月1日至2017年12月31日期间的地基雷达云探测数据，先对北京地区云宏观分布特征及时间变化特征进行了分析。基于高时空分辨率雷达数据所开展的工作，将更准确地对北京地区云宏观气候分布特征进行刻画，特别是对云垂直结构特征的统计分析工作，在已有的研究工作中并不多见，所做工作将对了解地区气候特征、地区区域模式中云参数化选择提供数值参考。全文共分为5个部分，第二部分为数据资料介绍；第三部分研究云出现率及其变化特征；第四部分研究云垂直分布特征及变化。第五部分是小结。

2 数据

2.1 Ka毫米波雷达

中国科学院大气物理研究所的Ka毫米波雷达（见图1），安装于大气所实验楼顶（39.967ºN，116.367ºE），探测参数包括雷达反射率（Z）、多普勒速度（V）、速度谱宽（W）和退偏比（LDR）（雷达性能参数见表1）。Ka毫米波雷达采用磁控管

表1　Ka毫米波雷达主要性能指标

Table1　Specifications of the Ka band radar

发射机性能指标	天线性能指标	接收机性能指标	信号处理
频段Ka（35.075 GHz）	直径1.5 m	工作模式为单发双收	库长30 m
峰值功率29 kW	增益54 dB	噪声5.8 dB	观测参数为Z、V、W、LDR
脉冲宽度0.2 μs	波瓣宽度0.4°	灵敏度−103 dBm	距离库数1660
脉冲频率3500 Hz	扫描方式为垂直对空、PPI、RHI、扇形	动态范围86 dB	

图1　中国科学院大气物理研究所Ka毫米波雷达

Fig. 1　The Ka band Doppler-radar at Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science

发射机机制，借助频谱仪、功率计等设备每两个月对雷达信号进行监测和标定，反射率精度小于1 dB。肖佩等（2018）对地物杂波和悬浮物杂波信号进行了统计分析，基于阈值法和中值滤波法建立了一个雷达数据质量控制方法。毫米波雷达频率高，受水汽衰减较为严重，特别是降雨过程。目前针对水汽衰减，我们采用如下方法进行了初步订正：

$$Z_{\mathrm{e}}(r)=Z_{\mathrm{m}}(r)/\exp[-0.2\ln(10)\int_0^r k_{\mathrm{H_2O}}(s)\,\mathrm{d}s], \quad (1)$$

其中，r为信号所经距离，Z_{e}为订正后反射率值，Z_{m}为反射率测量值，k_{H2O}为水汽吸收系数，s是路径。通常情况下雷达以垂直对天方式观测，有特殊观测任务或特殊天气情况时，根据需求改为其它方式。由于定点垂直对天方式为常规观测，积累数据量多，也为了方便统计和对比，本文分析数据只包含垂直对空探测数据，不包含其他扫描方式的观测数据，文章中所提雷达数据特指垂直对空探测数据。尽管目前我们对较严重的水汽衰减进行了订正，但对反射率的衰减订正工作尚不完备，但本文所用数据为垂直对空数据，信号路程短（小于16 km），且研究目标为云的宏观特征，因此当前的数据质量满足研究需求。未来我们将对反射率衰减订正进一步完善，便于开展微物理特征相关的研究工作。

2.2　观测情况统计

2014～2017年期间，由于断电、仪器故障、扫描方式改变等使得垂直对天观测偶有中断，我们按月统计垂直对空观测时长。定义一个自然月中，雷达垂直观测总时长占当月总时长的比例，称之为数据获取率。2014～2017各年各月的数据获取率情况由图2给出。4年共48个月，其中数据获取率大于85%的月份为34个，大于80%的月份有37个，2017年10月数据获取率最低，仅为50.4%；2014～2016年年平均数据获取率均大于85%，2017年年平均数据获取率为79.1%。需要说明的是，这里仅分析的是垂直对空数据获取率情况，不包括扇扫、体扫等其他方式雷达观测数据，因此实际雷达数据总体获取率情况要高于该值。

3　云出现率特征

3.1　年出现率与月出现率

雷达垂直探测获得的是头顶上方单个廓线数据，视场固定且范围小，不能直接计算云量。基于雷达数据探测特点，选择一定时段内（如小时、天、月等）云廓线出现时长计算其占总观测时长的比例，可估算地区云的发生情况，本文称之为云出现率。如果以年为单位计算则称为年出现率，以月为单位统计则称之为月出现率。利用4年雷达探测数据计算后，2014～2017年期间各年云出现率分

别为37.7%、37.5%、37.4%和32.3%，介于30%～40%。

按气候学上常用的季节分类方法，本文也定义3～5月是春季，6～8月是夏季，9～11月为秋季，其余为冬季。4年北京地区各年的月出现率以及4年平均的月出现率分布情况在图3中给出。月出现率变化情况在2014～2017年各年中分布特征略有不同，月出现率最大值及最小值所在月份也有所差异，例如2015年9月和10月分别是云出现率最高和最低值所在的月份；2017年云出现率最大值和最低值分别在7月和11月。就每个月的月出现率值年变化方面，1、4、7和8月的出现率值在4年中的变化相对较小，变化幅度小于10%，而其他月份则相对较高。图3中灰色条形图展示的是月出现率值4年平均结果，从1月到6月，云出现率逐步上升到一个小高值，7～8月略有下降，9月达到最高值（53.9%）而后逐月下降，12月云出现率最小，仅为22.7%。总体而言，北京地区12、1、2冬季3

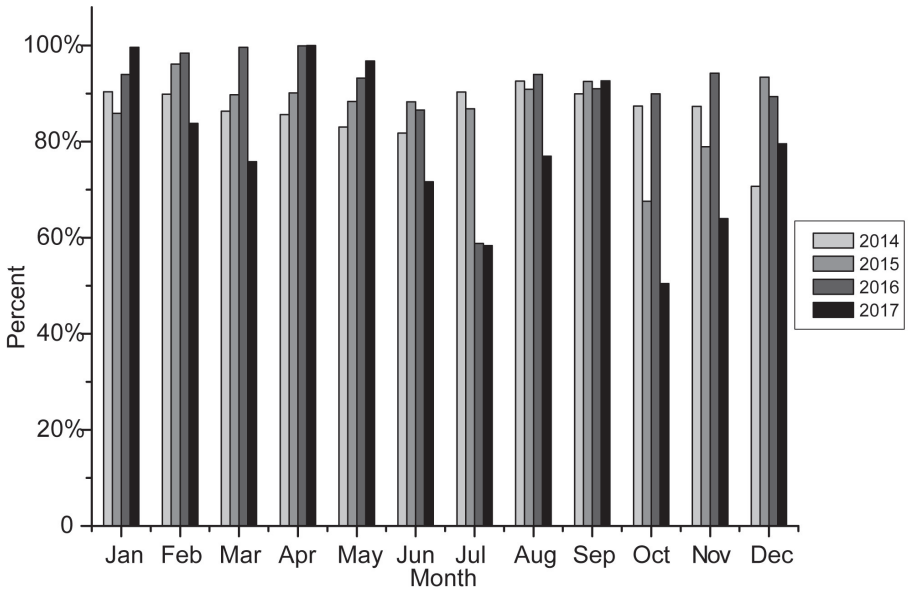

图2 2014～2017年每月垂直对空探测数据获取率情况

Fig. 2 Percent of radar observation time (in vertically pointing mode) to all times for each month during 2014–2017

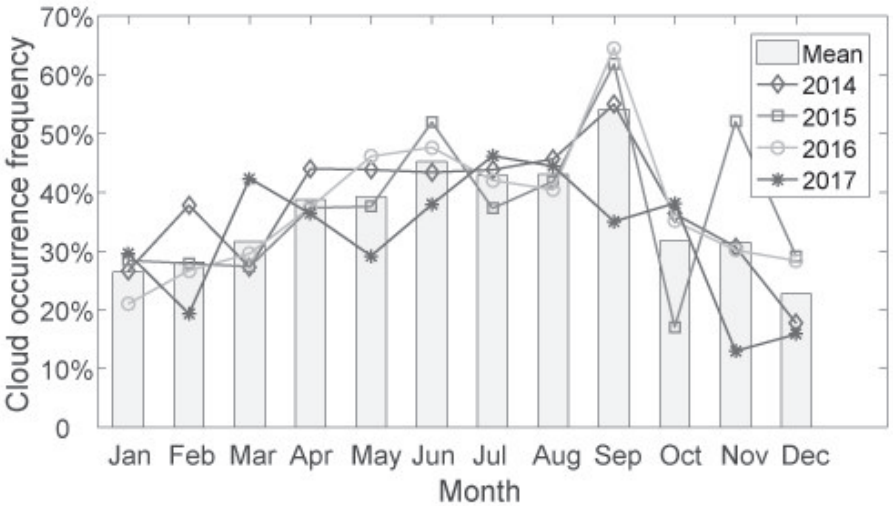

图3 2014～2017年月平均云出现率，灰色柱状图为平均月云出现率

Fig. 3 Monthly occurrence frequency of clouds from 2014 to 2017, gray bars are monthly mean occurrence frequency from 2014 to 2017

月的云出现率相对较低，6～9月是云出现率相对较大的月份。北京地处大陆性季风气候区，冬季风和夏季风交替活动，冬季干冷而夏季暖湿，因此呈现夏季云多而冬季云少的特征。特别地，2014～2016年月出现率最大值均发生在9月，分别是55.0%、61.9%、64.5%，但2017年仅为35.0%。

气候学上认为连续5 d日平均气温稳定升达22 ℃以上时，标志着一年中夏季的开始。受此定义启发，如果将云出现率连续最高的91 d（3个月）定义为夏季，那么通过滚动计算可估计各年“夏季”开始时间。以91天（相当于1个季节时间）为1个时间周期，滑动计算各年中云出现率最大值所在的时间段，结果4年最大值分别出现在2014年7月3日、2015年为7月13日、2016年为6月28日和2017年7月5日开始以及之后的91天中，即起始于6月底或7月初的91天时间内，出现率分别为47.9%、46.2%、46.8%、41.4%。气候学上定义的各年北京入夏时间分别是2014年5月13日、2015年5月14日、2016年5月16日、2017年5月7日。

3.2 小时出现率

相比卫星或气象观测员的人工观测，雷达定点观测数据时间分辨率具有绝对优势，能够在更小时间尺度上研究云的宏微观物理变化过程。以小时为单位统计云出现率，可了解北京地区云出现率的日变化情况。

计算过程中，先以小时为单位计算每天24 h各小时出现率，而后计算同一月中该小时出现率的平均值，再按季节计算季节平均值，最后计算4年的总平均值结果展现在图4中。图4中灰色条形表示小时出现率的总平均，各时段出现率分布在35%左右，时段之间的差距不显著，其中16:00（北京时间，下同）至22:00之间相对高些，而其他时段相对低一些。不同季节出现率日变化情况则有所不同，春、夏两季中午（11:00）过后至下午17:00之间出现率均呈现逐步升高、17:00后逐步下降的显著特点，增幅达15%以上。冬季和秋季，虽然某些连续时段内出现率也有一些变化，例如秋季出现率从01:00至13:00呈轻微逐步上升的趋势，随后逐步下降，但是上升和下降变化幅度较低，相比春夏季其日变化特征不显著。

3.3 云出现率与云量

云量表示天空中云覆盖的比例。探测传感器不同，云量的计算方法也各有不同。例如卫星搭载的光谱辐射计算法中（Ackerman et al.，1998），云量定义为探测视场内有云格点所占的比例；地面台站观测员观测云量，则为所见全天空范围内云所占的比例。霍娟和吕达仁（2012）曾利用西藏羊八井地区1年时间的全天空图像数据模拟计算了云出现率与云量之间的相互关系，研究结果表明羊八井地区，如果选取时间尺度越长（如以天或更长时间为单位），出现率和云量之间差距越小。

根据已有环北京地区平均总云量统计结果（刘洪利等，2003；刘瑞霞等，2004），历史平均云量值一般高于5。赵娜等（2012）利用1961～2008年台站气候观测资料统计了北京城区的总云量，在他们的研究结果中48年来北京城郊平均总云量分别是4.5和4.6，且在2001～2008年期间年平均云量表现为快速上升趋势，达到5左右。

我们还利用搭载在Aqua和Terra卫星上中分辨率成像光谱仪（MODIS）的云量产品数据也做了统计（图5），结果表明，2014～2017年各年平均云量（百分比）为53.2%、56.9%、50.7%、51.1%。图5中给出的MODIS各月平均云量值也高于对应月份的云出现率值，只是各月的差异程度有所不同，3、4和9月差异相比其他月份要小。总体来看，无论是年平均值或是月平均值，MODIS估算的云量值均高于雷达云出现率值，且平均大于10%以上。

在一个固定区域内，如果云随机出现，则在区域中任意一点统计的云出现率（小时以上），其值与云量值应比较接近；如果云的出现不随机，例如在某个区间较多出现而在其他区间较少出现，那么出现率与定点位置密切相关，当定点位置被选择在云较多出现处时，出现率应高于云量值，而当定点被选择在云较少出现时，出现率值应会小于云量值。北京地势西北高、东南低，西、北和东北群山环绕，向东南缓缓展开倾斜与渤海相连。由于地形抬升作用，北京西北山区成云条件相比平原好，而东南海洋上空水汽充足也利于云的形成，Ka毫米波雷达位于平原位置，云的形成条件相对较差，这可能是统计的云出现率值比台站观测和MODIS估算云量值低的主要原因。

图5中还给出了降水率月分布情况。降水率定义为一定时间内（如小时、天、月等）有降水廓线时长占所有观测时长的比例。2014～2017年年平均降水率占比分别为4.4%、8.5%、5.3%、5.7%。

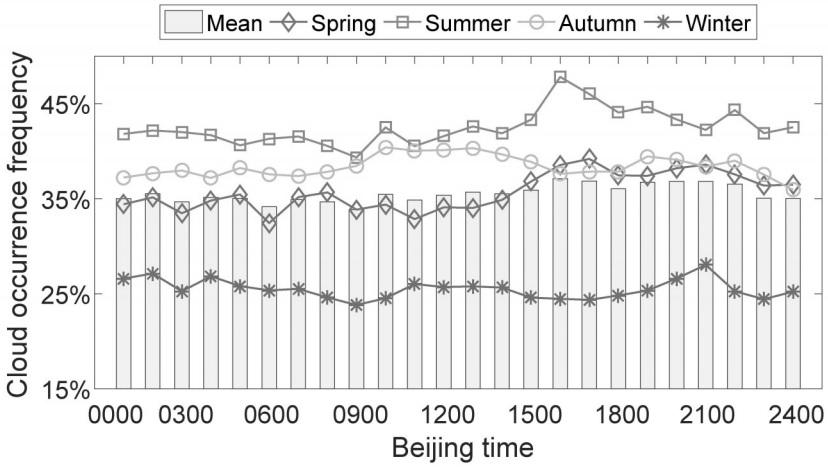

图4 2014～2017年云出现率总日变化及不同季节的分布特征。灰色柱状图为总平均出出现率日变化

Fig. 4 Daily variation of cloud occurrence in four seasons from 2014 to 2017, gray bars show mean daily occurrence

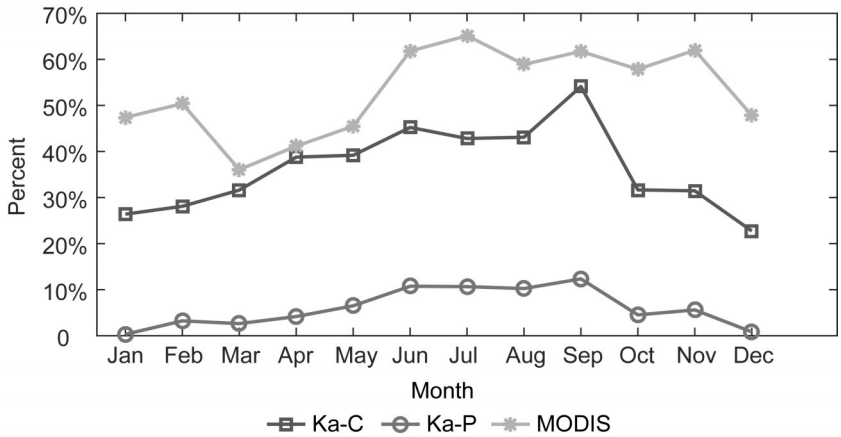

图5 2014～2017年平均MODIS云量、云出现率（Ka-C）和降水率（Ka-P）月分布

Fig. 5 Monthly distribution of mean cloud fraction from MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), cloud occurrence frequency (Ka-C), and precipitation occurrence (Ka-P) during 2014-2017

6～9月的平均降水率较大，均大于10%，最大值发生于9月，为12.4%，而12、1、2月的降水量较低，最低值发生于1月，仅为0.3%。

4 高度特征

4.1 云层分布

雷达观测的一条有云廓线中，如果有云距离库之间的无云距离库数大于5个（即150 m），则认为该廓线中至少有两层云。通过这个方法，我们对北京地区的云层分布情况进行了统计分析。综合统计来看，北京地区单层云占比约66.7%，两层占比约25.2%，两层以上的云所占比例约8.1%。图6中给出了2014～2017各年每月的云层分布情况，对比来看，分布特征基本相同，其中单层云的比例从1月开始至9月大致呈下降趋势，到9月时单层云比例最低，而后各月单层云比例又呈上升趋势。双层云或两层以上云的发生情况则与单层云的变化呈相反的特征，其比例高值均出现在9月。总体而言，北京地区单层云居多，尤其在冬季，约80%的云为单层云；6～9月，由于水汽相对充足、温度升高对流旺盛等作用，导致云层分布和变化相对复杂；夏秋交替的9月，单层云的比例最低，约为40%左右。

4.2 云顶高与云底高

综合统计4年观测数据，北京地区平均云底高约4.9 km，平均云顶高约7.2 km。非降水云中，所测有云廓线中最大云层厚度达10.1 km，发生于2014年8月12日20:00，同时该廓线所在云团也创

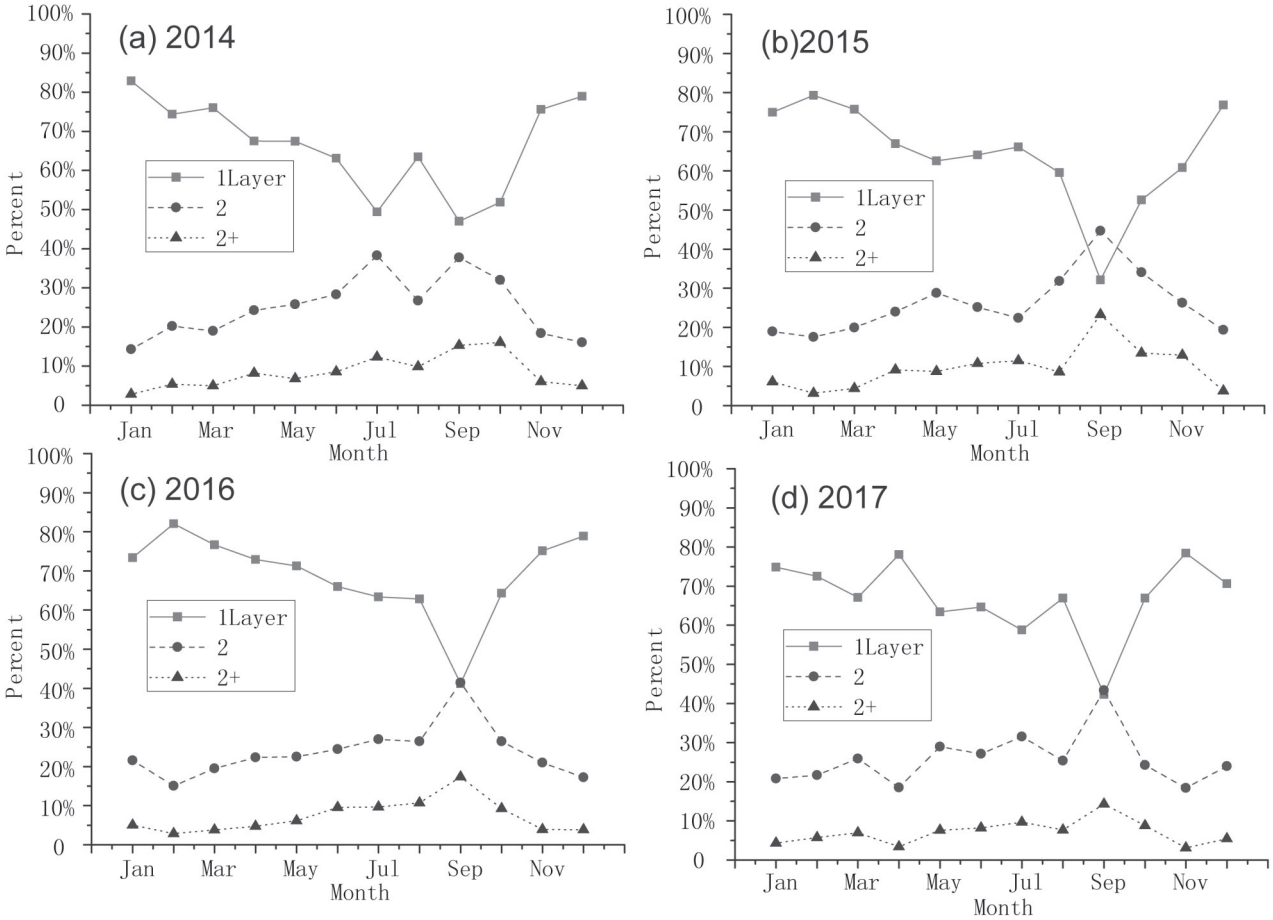

图6　2014～2017各年单层、双层及以上云层分布比例的月变化情况：（a）2014；（b）2015；（c）2016；（d）2017

Fig. 6　Monthly percent of single-layer, two layers, and 2+ layers to all layers from 2014 to 2017: (a) 2014; (b) 2015; (c) 2016; (d) 2017

造了平均云层厚度值最高记录，平均约7.5 km；所测云廓线中最大云顶高度为13.47 km，发生于多个个例中，但多分布在夏季。

2014～2017年各月总平均、各年平均云底高和云顶高分布情况在图7中给出。云顶高度分布方面，2014～2017年云顶高月分布情况略有不同，高值或低值出现月份也有差异。4年平均情况看（图7浅色菱形点虚线），月变化特征明显，从年初1月开始逐步上升，在6月达到峰值，而后下降到12月达到低值，全年6月最高约8.2 km，1月最低约6.2 km；夏季云顶高度平均为8.0 km，冬季平均云顶高度约6.3 km。云底高度方面，月变化特征与云顶高度变化特征相似，即从1月开始上升到6月达到最高，而后呈下降趋势。全年平均云底高6月最高约6.8 km，1月最低约4.4 km。有意思的是，9月虽然云出现率最高，但9月云顶高度均值仅有7.0 km，相比夏季明显降低，并且低于10月云顶高度，这一特征在2014～2017年每年都出现。

云底高度通常就是云的形成高度。水汽一般经两个途径由未饱和达到饱和形成云，一是水汽含量不变，降温冷却，二是温度不变，增加水汽含量，因此温度和水汽共同作用影响云的形成。北京水汽条件相对较差，云主要由潮湿空气在上升运动中绝热膨胀降温达到饱和形成，上升气流和充足的水汽是云生成的必要条件。大气的上升运动有辐射抬升、对流运动、地形抬升，各种湍流运动等。Ka毫米波雷达地处平原，大气上升运动主要以辐合抬升和对流运动为主，温度在对流层随高度增加而降低，而当水汽条件不充分时，温度成为了影响云形成的主要因素，从而影响和决定云的形成高度。所以，由于云的形成受温度影响较大，北京地区平均云底高度（形成高度）从1月至6月随大气平均温度升高，也逐步抬升，尽管8月在全年中大气平均温度最高，但6月起随着夏季风带来充沛的水汽，温度在云形成中的影响作用减弱，从而6～8月云的平均形成高度变化不大，而后随着大气平均温度

降低、水汽逐步减少，云的形成高度逐步下降。

4.3 高度和厚度分布比例

WMO（1956）公布的地面气象观测云分类标准中，根据观测和天气预报的需要，按云的底部距离地面的高度将云分成高、中、低和直展云4族。其中高云指云底高度大于5 km，中云云底高度为2.5～5 km，高度小于2.5 km的则归为低云。以此为高度标准，我们对北京地区各月高、中、低云分布情况也做了统计（结果见图8a）。北京地区除12月之外，各月高云所占比例最高，其中3～10月高云约占一半左右的比例。平均而言，低云所占比例最低，中云居中。图8b中给出的是北京地区5类云层厚度的分布情况，其中厚度小于1 km的云在各月中所占比例最高，大致分布在30%～45%；厚度

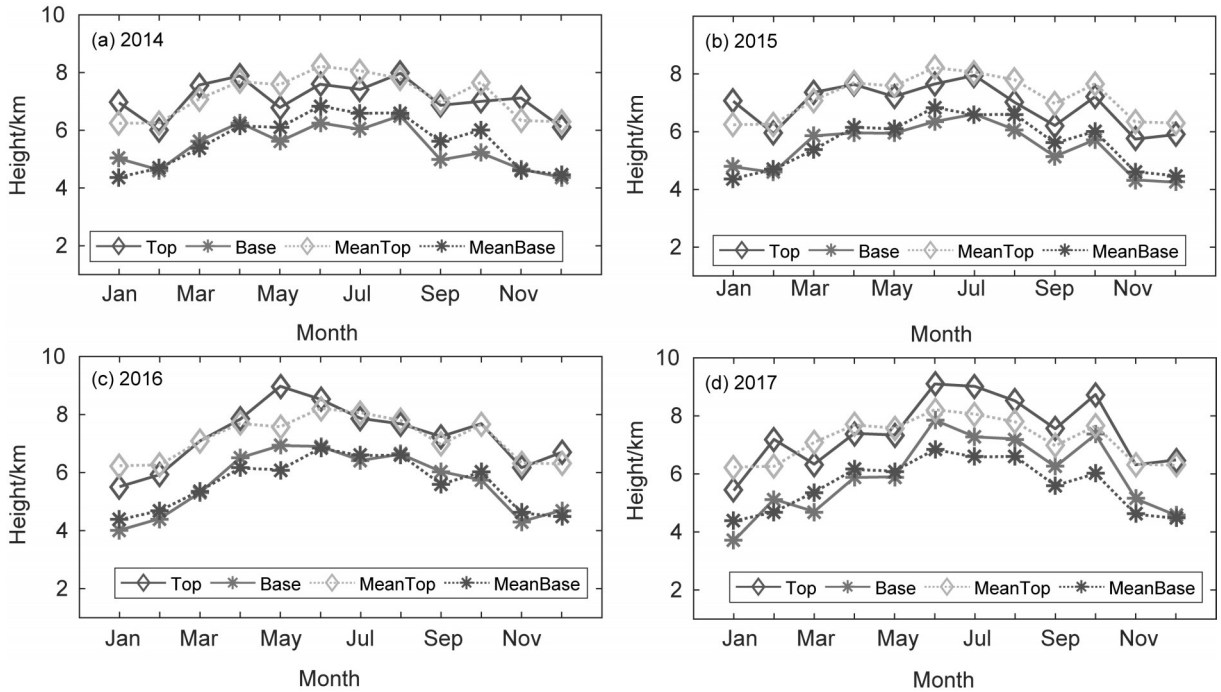

图7 2014～2017年云底高和云顶高月分布，虚线分别为4年平均云底高和云顶高：（a）2014；（b）2015；（c）2016；（d）2017

Fig. 7 Mean cloud base height and top height in each month from 2014 to 2017. The dashed line in each panel shows the mean cloud base height and top height from 2014 to 2017: (a) 2014; (b) 2015; (c) 2016; (d) 2017

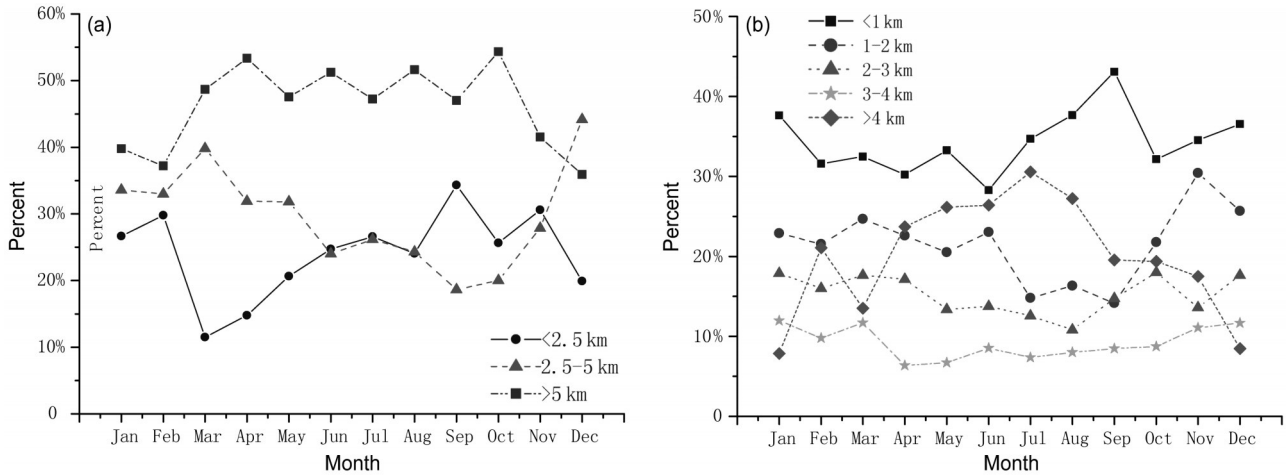

图8 （a）各月高、中、低云所占比例分布；（b）以云厚1 km为间隔，统计各月不同厚度云的比例分布

Fig. 8 Mean percent of high-level, middle-level, and low-level clouds in each month. (b) Mean percentages of clouds with different depths (1 km steps) in each month

在1～4 km的云随厚度越大所占比例越低；厚度大于4 km的云在4～9月所占比例仅次于1 km的云。夏季3个月的厚云比例相对较高，其中7月最高，大于4 km的云约占30.6%。云顶高度和云层厚度常常与大气动力学特征密切相关，在强对流云团发展中也是关键的指示因子。4年统计结果显示北京地区夏季云顶高度平均最高，高厚度云层的比例也最大，与北京大陆性季风气候特征相吻合。

5 小结

中国科学院大气物理研究所地基Ka毫米波雷达于2010年架设，经过近2年时间调试，于2012年10月起开始投入观测，2013年夏季因设备单元故障停止观测，秋季恢复观测至今已准连续运行多年，积累了丰富的观测数据。我们对获得的垂直对空雷达观测时长进行了统计，其中2014～2016年平均观测时长占比（数据获取率）均大于85%，2017年年平均数据获取率为79.1%。文章还利用2014～2017年垂直对空定点观测Ka毫米波雷达数据对北京地区云出现率季节变化、月变化、日变化，特别是垂直分布特征进行了定量化统计分析，主要结果总结如下：

（1）云出现率。2014～2017年期间各年云出现率分别为37.7%、37.6%、37.4%和32.3%，4年平均值约36.3%；冬季最低，夏季最大；月出现率值9月最大为53.9%，12月最小约为22.7%。不同季节出现率日变化情况有所不同，春夏两季呈现中午（11:00）开始出现率逐步升高至下午17:00而后逐步下降的特点，增高幅度大于15%；冬季和秋季发生率日变化特征不显著。

（2）降水发生率。2014～2017年降水发生率分别为4.4%、8.5%、5.3%、5.7%。6～9月降水发生率相对较大，均大于10%，其中9月值最大为12.4%；12、1、2月降水发生率相对较低，1月值最低仅为0.3%。

（3）云层分布特征。2014～2017年单层云占比最高，约占66.7%；两层云其次，占比约25.2%；两层以上的云仅占8.1%。云层分布季节变化差异较大，冬季约80%的云为单层云，6～9月云层变化最多，其中9月单层云比例约为40%。

（4）高度分布特征。2014～2017年平均云底高约4.9 km，平均云顶高约7.2 km。非降水云廓线中，最大云层厚度达10.1 km，最大云顶高达13.47 km。云顶高和云底高的月变化特征明显，从年初1月开始逐步上升，在6月达到峰值，而后下降到12月达到低值，与温度相关；3～10月，高云（云底高>5 km)占约一半左右的比例；厚度小于1 km的云在各月中所占比例最高，大致分布在30%～45%之间。厚度1～4 km之间的云，厚度越大所占比例越低。厚度大于4 km的云在4～9月所占比例仅次于1 km的云，其中7月大于4 km的云比例最高约为30.6%。

致谢 本文雷达数据积累多年，来之不易，感谢参与设备研制、调试、维护的所有科研人员，他们的付出和奉献保证了仪器的稳定运行，从而获得如此多宝贵的数据资料，为本文研究工作提供了数据基础。

参考文献（References）

Ackerman S A, Strabala K I, Menzel W P, et al. 1998. Discriminating clear sky from clouds with MODIS[J]. J. Geophys. Res., 103(D24): 32141–32157. doi:10.1029/1998JD200032

Adhikari L, Wang Z, Deng M., 2012. Seasonal variations of Antarctic clouds observed by CloudSat and CALIPSO satellites [J]. J. Geophys. Res., 117, D04202. doi:10.1029/2011JD016719

丁守国, 石广玉, 赵春生, 等. 2005. 近20年全球总云量变化趋势分析[J]. 应用气象学报, 16(5): 670–677. Ding Shouguo, Zhao Chunsheng, Shi Guangy, et al. 2005. Analysis of global total cloud amount variation over the past 20 years [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16(5): 670–677.

方宗义, 许健民, 赵凤生. 2004. 中国气象卫星和卫星气象研究的回顾和发展[J]. 气象学报, 62(5): 550–560, 717. Fang Zongyi, Xu Jianmin, Zhao Fengsheng. 2004. Progress and prospect of China meteorological satellite and satellite meteorology[J]. Acta Meteorol. Sin. (in Chinese), 62(5): 550–560, 717. doi: 10.3321/j. issn: 0577-6619.2004.05.004

霍娟. 2015. 基于CloudSat/CALIPSO资料的海陆上空中云的物理属性分析[J]. 气候与环境研究, 20(1): 30–40. Huo Juan. 2015. Physical properties of mid-level clouds based on CloudSat/CALIPSO data over land and sea[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20(1): 30–40. doi: 10.3878/j. issn. 1006-9585. 2014.13188

霍娟, 吕达仁. 2012. 全天空图像分析西藏羊八井2009～2010年云量特征 [J]. 气候与环境研究, 17(4), 393–399. Huo Juan, Lü Daren . 2012. Cloud amount analysis at Yangbajing of Tibet in 2009-2010 using all-sky images[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (4): 393–399. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10148

刘洪利, 朱文琴, 宜树华, 等. 2003. 中国地区云的气候特征分析[J]. 气象学报, 61(4): 466–473, 517–518. Liu Hongli, Zhu Wenqin, Yi Shuhua, et al. 2003. Climatic analysis of the cloud over China[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61(4): 466–473,

517−518.

刘瑞霞, 刘玉洁, 杜秉玉. 2004. 中国云气候特征的分析[J]. 应用气象学报, 15(4): 468−476. Liu Ruixia, Liu Yujie, Du Bingyu. 2004. Cloud climatology characteristics of China from isccp data[J]. J. Appl. Meteorol. Sci. (in Chinese), 15(4): 468−476. doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2004.04.009

Pfister G G, Mckenzie R, Liley J B, et al. 2003 Cloud coverage based on all-sky imaging and its impact on surface solar irradiance[J]. Journal of Applied Meteorology, 2003, 42(10): 1421−1434. doi: 10.1175/1520-0450(2003)042<1421:CCBOAI>2.0.CO;2

Rossow W B, Schiffer R A. 1991. ISCCP cloud data products[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 72(1): 2−20. doi:10.1175/1520-0477(1991)072<0002:icdp>2.0.co;2

Rossow W B, Schiffer R A. 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80(11): 2261−2287. doi: 10.1175/1520-0477(1999)080<2261:aiucfi>2.0.co;2

Rossow W B, Walker A W, Garder L C. 1993. Comparison of ISCCP and Other Cloud Amounts [J]. Journal of Climate, , 6(12): 2394−2418. doi:10.1175/1520-0442(1993)006<2394:COIAOC>2.0.CO;2

Sassen K, Wang Z, Liu D. 2008. Global distribution of cirrus clouds from CloudSat/Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) measurements [J]. Journal of Geophysical Research, 113.

翁笃鸣, 韩爱梅. 1998: 我国卫星总云量与地面总云量分布的对比分析 [J]. 应用气象学报, 9, 32－37. Wen Duming, Han Aimei. 1998. Comparison between total cloudiness from satellite cloud pictures and ground observations over China. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 9, 32－37.

World Meteorological Organization. 1956. International Cloud Atlas: abridged atlas[D]. WMO, Geneva,1956.

肖佩, 霍娟, 毕永恒. 2018. 地基Ka波段云雷达数据质量控制方法研究分析[J]. 成都信息工程大学学报, 33(2): 129−136. Xiao Pei, Huo Juan, Bi Yongheng. 2018. Ground-based Ka band cloud radar data quality control[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese), 33(2): 129−136. doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2018.02.005

赵娜, 刘树华, 杜辉, 等. 2012. 城市化对北京地区日照时数和云量变化趋势的影响[J]. 气候与环境研究, 17(2), 233−243. Zhao Na, Liu Shuhua, Du Hui, et al. 2012. The effects of urbanization on sunshine duration and the trend of cloud cover amount variation in Beijing area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(2), 233−243. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10140