

基于 Ka 波段云雷达观测的中国西天山降雨云宏微观物理特征研究

张晋茹^{1,2,3}, 杨莲梅^{1,2,3*}, 刘凡^{1,2,3}, 李建刚^{1,2,3}, 周玉淑^{4,5}

1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002

2 新疆云降水物理与云水资源开发实验室, 新疆 乌鲁木齐 830002

3 西天山云降水物理野外科学观测基地, 新疆 乌鲁木齐 830002

4 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029

5 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 利用 Ka 毫米波云雷达与自动气象站降雨资料, 研究了西天山地区 2019 年和 2020 年 5-8 月的降雨云宏微观特性。结果表明: (1) 降雨主要发生在夜间, 累积降雨量集中在 21:00 至次日 07:00, 降雨频次和累积降雨量相关系数为 0.71。大雨强频次虽最少, 但对总累积降雨量贡献较显著; (2) 小雨强、中雨强、大雨强平均反射率因子最大值分别为 30 dBZ、35.8 dBZ 和 39.5 dBZ, 最大平均液态水含量分别为 $1.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $4.2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $7.3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$; (3) 不同降雨强度对应的反射率因子都有两个集中区域, 2.0~4.4 km 反射率因子集中在 15~26 dBZ, 地面附近的小雨强、中雨强、大雨强对应的反射率因子分别集中在 24~32 dBZ、29~38 dBZ 和 31~42 dBZ。1.75 km 以下中雨强和大雨强液态含水量小于 $1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的频率明显少于小雨强, 降雨强度的越大降雨粒子径向速度越集中。

关键词: 西天山地区, 毫米波云雷达, 降雨云, 反射率因子, 液态水含量

文章编号: 2021112C

中图分类号: P412.25

文献标识码:

Doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2112.21112

Macro-micro Physical Characteristics of Rainfall Clouds in the West Tianshan Mountains Based on Ka Band Cloud Radar

ZHANG Jinru^{1,2,3}, YANG Lianmei^{1,2,3*}, LIU Fan^{1,2,3}, LI Jiangan^{1,2,3}, Zhou Yushu^{4,5}

1 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi, 830002, China

收稿日期: 2021-7-01

网络预出版日期:

作者简介: 张晋茹 (1992-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事大气探测研究。E-mail: 751639350@qq.com

通讯作者: 杨莲梅 (1969-), 女, 研究员, 主要从事灾害性天气研究。E-mail: yanglm@idm.cn

项目基金: 国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项(2018YFC1507102);国家自然科学基金(U200310186);新疆维吾尔自治区引进高层次人才天池计划项目(2019)

Funded by National key research and development program "monitoring, warning and prevention of major natural disasters" key project (2018YFC1507102); National Natural Science Foundation of China (U200310186); Flexible Talents Introducing Project of Xinjiang(2019)

2 Xinjiang Cloud Precipitation Physics and Cloud Water Resources Development Laboratory, Urumqi,
830002,China

3 Field Scientific Observation Base of Cloud Precipitation Physics in West Tianshan Mountains, Urumqi,
830002,China

4 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese
Academy of Sciences, Beijing, 100029,China

5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049,China

Abstract: Based on Ka-band millimeter wave cloud radar and rainfall data from automatic weather stations, this study analyzed the physical characteristics of rainfall clouds in the West Tianshan Mountains, from May-August 2019 and 2020. The results show that: (1) Rainfall mainly occurs at night. The cumulative rainfall was concentrated from 21:00 to 07:00 the next day. There was a significant positive correlation between rainfall frequency and accumulated precipitation. The frequency of heavy rainfall was the least, but the contribution to the total accumulated rainfall was significant; (2) The maximum average reflectivity of light rainfall intensity, moderate rainfall intensity, and heavy rainfall intensity were 30 dBZ、35.8 dBZ, and 39.5 dBZ, and the maximum average liquid water content was $1.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $4.2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $7.3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$;(3) There are two concentrated areas for the reflectivity of different rainfall intensities. The reflectivity of 2.0~4.4 km were concentrated in 15~26 dBZ, and the reflectivity of light rainfall intensity, moderate rainfall intensity and heavy rainfall intensity near the ground were respectively concentrated in 24 ~32 dBZ, 29~38 dBZ and 31~42 dBZ. The frequency of moderate rain intensity and heavy rain intensity below 1.75 km where the liquid water content is less than $1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ is significantly less than that of light rain intensity. The greater the rainfall intensity, the more concentrated the radial velocity of rainfall particles.

Keyword: Tianshan Mountains region, Millimeter wave cloud radar, rainfall clouds, Reflectivity, Liquid water content

1 引言

云是天气和气候变化的主要影响因子之一,通过大气热力运动引起的辐射强迫影响地球的能量收支和水循环(Wielicki et al.,1995; Stephens and Graeme,2005; Zhou et al.,2016)。云的宏微观特性能够反映云降水潜力及内部动力、热力特征,因此,对云的宏微观物理特征进行观测、反演和研究,对于改进模型中云的参数,了解云在气候变化中的反馈效应具有重要意义(Ackerman and Stokes,2003; Harrison et al.,1990; Bu et al.,2016)。目前,云的宏微观物理特征可以通过飞机、卫星和地面设备进行观测(Reddy et al.,2018; Chen et al.,2016; Yin et al.,2013)。飞机虽然可以得到精细的观测结果,但是采样空间较小且成本较高(Parish and Leon,2013)。卫星的探测范围广,但时空分辨率低(Yi,2019)。

毫米波云雷达有很高的灵敏度和时空分辨率(张晋茹和杨莲梅,2019; 马宁堃等,2019),可对云进行连续观测,还能够通过反射率因子、径向速度等产品获取云的宏微观物理垂直结构特征(李海飞等,2017; Pavlos et al.,2011),因此毫米波云雷达是研究云宏微观物理特征的有效观测仪器。在我国,研究人员仅在中国中部和东部以及青藏高原利用毫米波云雷达进行了研究(彭亮等,2012; Zhao et al.,2016; 汪会和郭学良,2018)。Zhang et al.(2019)基于云雷达三年的观测资料对北京地区云的垂直结构进行了研究,研究发现夏季和秋季云顶高度和反射率因子大于春季和冬季。王柳柳等(2017)利用云雷达对贵州威宁冻雨-降雪微物理和动力特征进行分析,结果表明冻雨和降雪初始时粒子的平均半径分别在 $40 \mu\text{m}$ 和 120

μm 左右。Qiu et al. (2018) 使用云雷达对青藏高原地区夏季云垂直结构和含水量进行分析, 发现当地时间 00:00-06:00、06:00-12:00、12:00-18:00 和 18:00-24:00 云的出现概率分别为 82.7%、56.2%、55.3%和 65.4%。这类研究对于了解中国云和降水的宏微观物理特征具有重要意义。然而, 利用毫米波云雷达对我国干旱地区降雨过程开展的研究还很少。

新疆是典型的干旱、半干旱区域(黄秋霞等, 2015a), 与中国东部不同, 该地区不受季风系统影响, 降水量偏少(Huang et al.,2017)。天山山脉是新疆最重要的山脉, 最高海拔超过 5000 m, 天山山麓是降水最多的地区, 也是主要的人口聚居区。从全球大气环流角度看, 新疆处于西风带地区, 降水与西风带常年存在的槽和涡向东移动有关。因此, 云和降水对这一地区的生态环境和生命有着极其重要的作用(Zeng et al.,2020a)。以往对新疆降雨的研究主要集中在天气系统、中尺度系统和降雨环境(杨莲梅等, 2011; 曾勇等, 2019; Zeng and Yang,2020b), 对降雨云宏微观物理的研究较少。Zeng et al. (2020a,2021) 使用雨滴谱仪对西天山地区春季和雨季雨滴谱等微物理特征进行研究, 但只是对近地面的雨滴谱特性进行分析, 没有对高空中降雨云微物理特征进行研究。伊犁河谷是西天山具有代表性的降水区域。中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所于 2019 年 1 月 22 日在伊犁河谷新源气象站(83°18' E、43°27' N, 海拔: 928 m)(图 1) 安装毫米波云雷达进行观测。本文选取毫米波云雷达反射率因子、径向速度、云顶高参数以及通过反演得到的液态含水量, 对新源站 2019 年 5-8 月、2020 年 5-8 月降雨云宏微观特性进行分析(降雨量使用气象站雨量计观测数据), 初步认识了西天山地区降雨云宏微观物理特征。

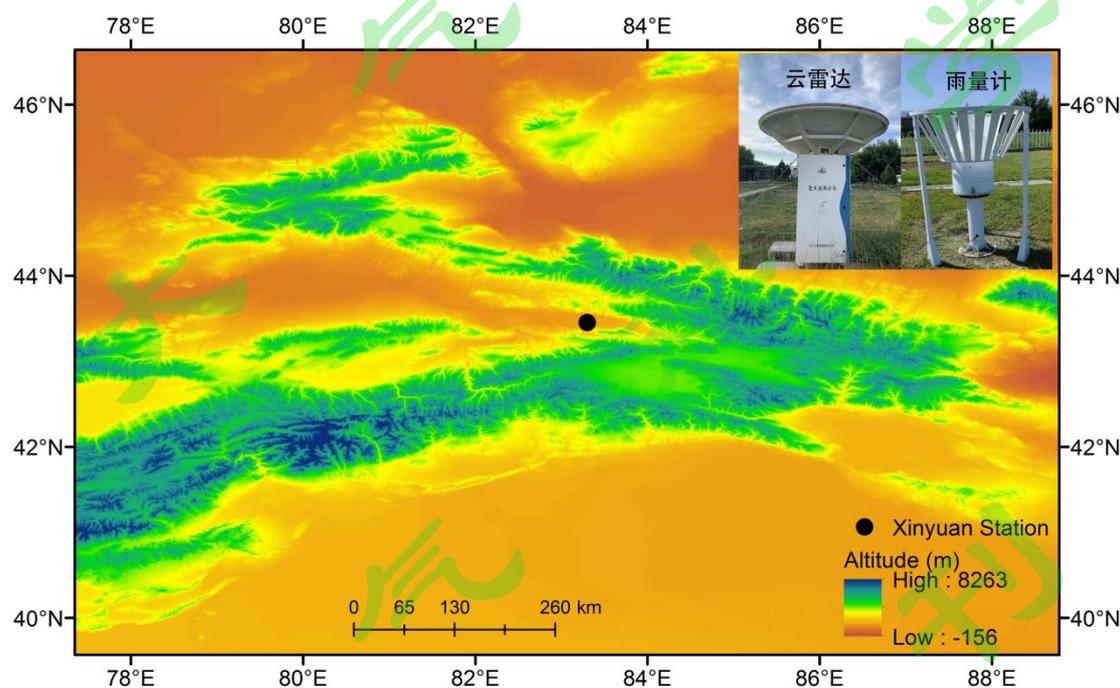


图 1 新源气象站位置(83°18' E、43°27' N, 海拔: 928 m)、毫米波云雷达和雨量计图

Fig.1 Location of Xinyuan Meteorological Station(XY, 83°18' E、43°27' N, 928 m above sea level) and the photos of the millimeter-wave cloud and rain gauge

2 资料与方法

2.1 数据资料

本文使用中国航天科工集团 23 所研制的 Ka 波段雷达, 型号为 HMB-KPS, 该雷达采用全相干、全固态、脉冲压缩、脉冲多普勒、单偏振、垂直向上的方式 24h 连续观测。云雷达数据包括反射率因子、径向速度、速度谱宽、云顶、云底等。其他主要参数见表 1。雷达有

3 中探测模式参数见表 2。选取 2019 年、2020 年 5-8 月共 8 个月降雨时的数据，降雨量为逐小时降水资料，单位为 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。在分析和统计过程中，小时降雨量大于等于 $0.1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的时次判定为有降雨发生。通过对云雷达资料观察即使有些时次被判定为有降雨发生，但由于降雨时间较短也会有一些时刻并没有发生降雨，由于云雷达在夏季非降雨时刻在低层会出现晴空回波，因此本文通过对云雷达资料进行观察，剔除无降雨时刻的数据，只保留被判定为有降雨发生时次且有降雨时刻的数据。由于降雨时毫米波雷达的回波强度会有衰减，因此厂家使用了 k-Z 衰减订正法（王振会等，2011）对回波强度进行了订正。本文所使用时间均为北京时(CST)。

表 1 毫米波云雷达主要参数

Table.1 Main performance indexes of the Ka-band millimeter wave cloud radar system

参数名称	参数值
工作频率	35GHz±500MHz
波束宽度	≤0.4°
发射功率	≤500 W
天线增益	≥52 dB
天线直径	1.8 m
探测范围	0.21-15 km
时间分辨率	1 min
空间分辨率	30m
发射波长	8.6 mm

表 2 毫米波云雷达三种探测模式--边界层模式、中云模式、卷云模式对应的工作参数

Table.2 Detailed parameters of Boundary Layer, Middle cloud, Cirrus observation mode of Ka band millimeter wave cloud radar

项目	边界层模式	中云模式	卷云模式
脉冲宽度	0.2 μs	8 μs	24 μs
脉压比	1	40	120
脉冲重复周期	60 μs	120 μs	167 μs
相干积累数	2	1	1
非相干积累数	32	32	32
FTT 点数	256	256	256
探测盲区	210 m	1.2 km	3.8 km
探测能力	-18.23dBZ@5km	-32.54dBZ@5km	-30.78dBZ@10km

雷达参数在 3.8 km 高度上有明显的分层（如图 2），这是由于毫米波云雷达在探测弱回波时，不仅需要满足探测距离而且还要确保探测能力采用脉冲互补技术造成的，雷达使用宽脉冲保证有足够的探测能力对弱回波进行探测，但是在低层会有探测盲区的出现，这部分盲区使用窄脉冲来进行探测，但窄脉冲对弱回波的探测能力有限，因此低层回波很弱时就会有回波不连续的现象发生。陈羿辰等（2018）和黄钰等（2020）基于云雷达对降雪过程进行观测也有相似分层现象，即使存在断层现象也能够得到一些有用的结论。

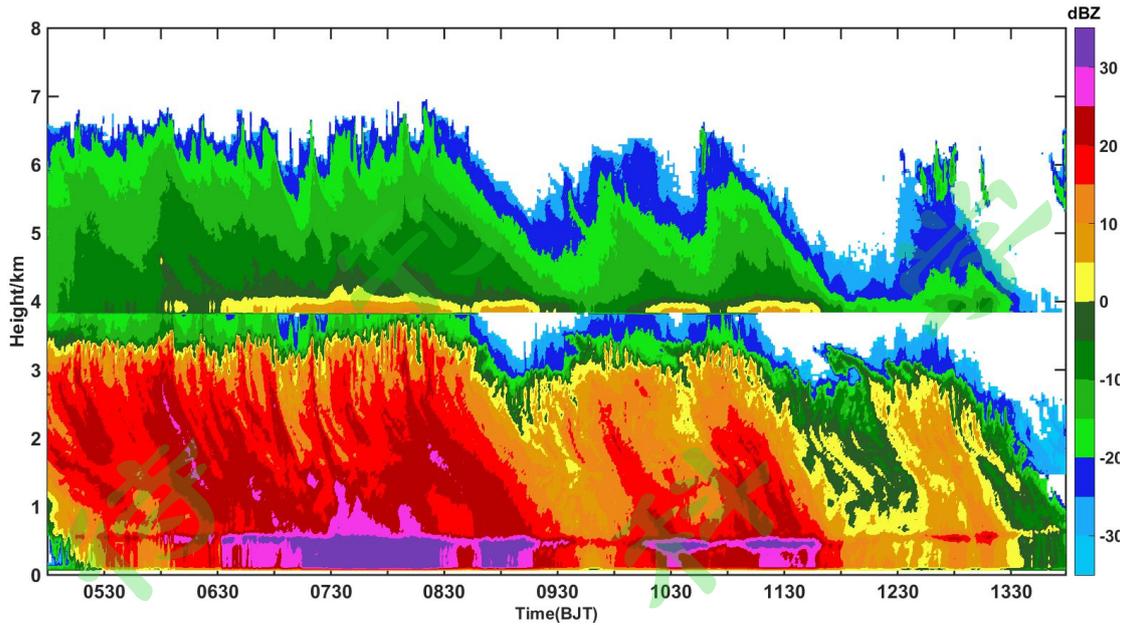


图2 2019年5月5日05:00-14:00降雨时反射率因子高度-时空分布图

Fig.2 Height-time evolutionary charts of reflectivity during rainfall from 05:00 to 14:00 on May 5, 2019

选择有降雨发生时刻的降雨量数据和该时刻所对应的云雷达数据进行分析。小时降雨量为 R ，本文参考黄秋霞等（2015b）分类标准，按照小时降水量 $0.1 \text{ mm} \leq R < 1 \text{ mm}$ 、 $1 \text{ mm} \leq R < 3 \text{ mm}$ 、 $3 \leq R \text{ mm}$ 将降雨分为小雨强、中雨强、大雨强。观测期间一共有 381 h 的降雨，其中小雨强有 242 h，中雨强有 110 h，大雨强有 29 h。由于各种原因导致云雷达有些缺测，因此云雷达的有效降雨数据有 323 h，其中小雨强有 214 h，中雨强有 88 h，大雨强有 21 h。云雷达时间分辨率为 1min，将 1min 作为 1 个观测样本，因此共获得了 19980 份有效降雨观测样本，其中小雨强、中雨强、大雨强分别有 12840、5280、1260 份。

2.2 方法

2.2.1 云雷达云顶分析方法

本文按照吴翀等（2017）的方法得到云顶高度。将云雷达观测到的有效云信号的边界作为云边界，沿距离把云雷达每个径向数据分为一段一段连续的有效数据段，如果相邻两个回波段的间距小于一定阈值（90 m），则把这两个段合并为一个段，如果段的长度小于设定的阈值（120 m）则删除这个数据段。这样连续有效的数据段的上沿为云顶。

2.2.2 归一化等频率高度图

Yuter and Houze（1995）首先提出等频率高度图（简称 CFAD）用于显示风暴统计分布特征，由于 CFAD 在某些高度层如果没有足够的样本量就会扩大风暴在该高度层的频率，实际上风暴在该高度中出现的次数并不多。因此 Fu et al.（2003）和 Guo et al.（2018）提出了一种改进 CFAD 的方法，称为归一化等频率高度图（Normalized Contoured Frequency by the Altitude Diagram: NCFAD），即对所有高度层的样本量作归一化处理。本文采用 NCFAD 方法来研究降雨时云的垂直结构，即在某一高度层、某数值范围内雷达反射率因子、径向速度和液态含水量出现的次数占所有高度层上出现次数的百分比。NCFAD 的计算式为：

$$NCFAD = \frac{N_z(i, j)}{\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^n N_z(i, j)} \quad (1)$$

其中， $N_z(i, j)$ 是频率分布函数，定义为第 i 层高度和第 j 个反射率因子、径向速度、液态含水量出现的次数。210m 以下是毫米波云雷达的盲区，因此只取 210m 以上的数据。

在归一化等频率高度图中纵坐标为高度，为了方便计算和统计，将归一化等频率高度图垂直分辨率由 30 m 调整为 150 m，共计 93 层；纵坐标分别是反射率因子(Z)、径向速度(V)和液态含水量(LWC)，间隔分别为 1 dBZ、0.25 $m \cdot s^{-1}$ 和 0.1 $g \cdot m^{-3}$ 。

2.2.3 液态含水量反演

雷达照射体积内水凝物粒子的物理特性与其后向散射能力有密切的联系，在 Rayleigh 散射的条件下，雷达观测的反射率因子与雨滴直径的六次方成正比。在用 Ka 波段雷达观测降雨时 Rayleigh 散射的假设一般不再成立。所以通常用等效反射率因子 Z_e 表示，单位是 $mm^6 \cdot m^{-3}$ ，由于 Z_e 变化范围很大，往往跨越几个数量级，为了应用方便，通常用 dBZ 来表示反射率因子的大小（俞小鼎，2006），即：

$$dBZ = 10 \cdot \lg \frac{Z_e}{Z_0} \quad (Z_0 = 1mm^6 \cdot m^{-3}) \quad (2)$$

Atlas 和 David (1954) 首先提出 Z_e 与液态含水量 LWC 存在幂指数关系：

$$LWC = aZ_e^b \quad (3)$$

李海飞 (2018) 对前人云中形成降水和非降水，毛毛雨和小雨回波强度阈值进行了分析，最终根据 Shupe (2007) 取 -17 dBZ 为区分毛毛雨和非降水性水凝物的阈值，取 5 dBZ 为区分毛毛雨和小雨的阈值。根据回波强度采用不同的经验公式，非降水粒子采用 Atlas 和 David (1954) 的经验公式，毛毛雨采用 Baedi et al. (2000) 的经验公式，小雨采用 Krasnov (2005)，详见表 2。

表 2 回波分类法经验公式

Table.2 Empirical formula of echo classification

回波强度 Z 分类	反演方法	经验关系
$Z < -17$ dBZ	$LWC = 4.564Z_e^{0.5}$	Atlas
-17 dBZ $\leq Z < 5$ dBZ	$LWC = 0.457Z_e^{0.19}$	Baedi
$Z \geq 5$ dBZ	$LWC = 0.02584Z_e^{0.633}$	Krasnov

3 降雨云宏微观物理特征

3.1 降雨日变化

云和降水日变化的探测和研究对于提高云物理和动力的认识有重要意义 (Zheng et al., 2019)。复杂地形地区的云和降水的日变化明显，这对了解云和降水的产生和发展过程具有重要意义 (Villalobos-Puma et al., 2019; Zeng et al., 2020c)。图 3 是降雨频次和累积降雨量日变化。降雨频次日变化明显，降雨主要集中在 22:00 至次日 08:00，该时段降雨发生次数为 211 次，占总降雨次数的 55.38%，05:00-06:00 降雨频次达到最高为 24 次。降雨频次最低的两个时段是 15:00-16:00 和 16:00-17:00，都为 8 次。以上结论与黄秋霞等 (2015a,b) 发现伊犁河谷降水主要发生在夜间结果是一致的。累积降雨量波动性较大，最大值出现在 22:00-23:00，为 30.6 mm，最小值出现在 13:00-14:00，为 6.2 mm。累积降雨量集中在 21:00 至次日 07:00，占总降雨量的 54.3%。从相关性来看，降雨频次和累积降雨量正相关，相关系数为 0.71。

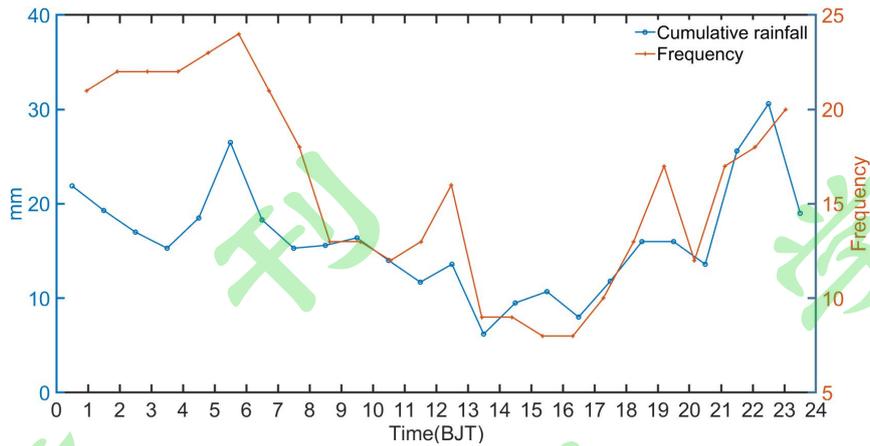


图3 降雨频次、累积降雨量日变化

Fig.3 Diurnal variation of rainfall frequency and cumulative rainfall

根据雨强的分类，我们分析了小雨强、中雨强和大雨强出现频次（图4（a））和各自累积降雨量（图4（b））日变化。图中分别将小雨强、中雨强、大雨强标为I、II、III型降雨（图7做了同样的标注）。图4（a）可得小雨强频次最多，23:00-次日08:00频次较高，其中03:00-04:00最高达17次，此后降雨频次呈下降趋势，15:00-16:00、16:00-17:00两个时段达到最低为5次，整体看白天的降雨频次较夜间低。中雨强频次日变化较小，但也为白天的降雨频次较夜间低，21:00-次日07:00频次较高，最高在22:00-23:00为8次，最小在15:00-16:00为1次。由于小时降雨量级大于3 mm的次数很少，且只有2a的降雨资料，因此大雨强在某些时段频次为0，降雨频次最多时段分别为00:00-01:00、05:00-06:00和22:00-23:00，都为3次。结合所有降雨发生频次日变化（图3）发现，22:00-23:00降雨主要由中雨强引起，其余时段的降雨主要由小雨强引起，大雨强对总降雨发生频次贡献最小。

由图4（b）得小雨强累积降雨量在00:00-08:00较大，06:00-07:00最大为7.5 mm，09:00-24:00都在3.7 mm及以下，15:00-16:00最小为1.6 mm。中雨强累积降雨量大多数时段大于小雨强和大雨强的累积降雨量，17:00至次日07:00较大，22:00-23:00最大为13.6 mm，15:00-16:00最小为1.5 mm。大雨强累积降雨量跳跃性较大，存在五个时段较大分别为00:00-02:00、05:00-06:00、08:00-10:00、15:00-16:00、22:00-23:00，其中22:00-23:00最大为15.1 mm。小雨强、中雨强、大雨强累积降雨量占总累积降雨量比重分别为22.54%、47.44%、29.99%，虽然大雨强降雨频次最少，但对总累积降雨量贡献要大于小雨强。

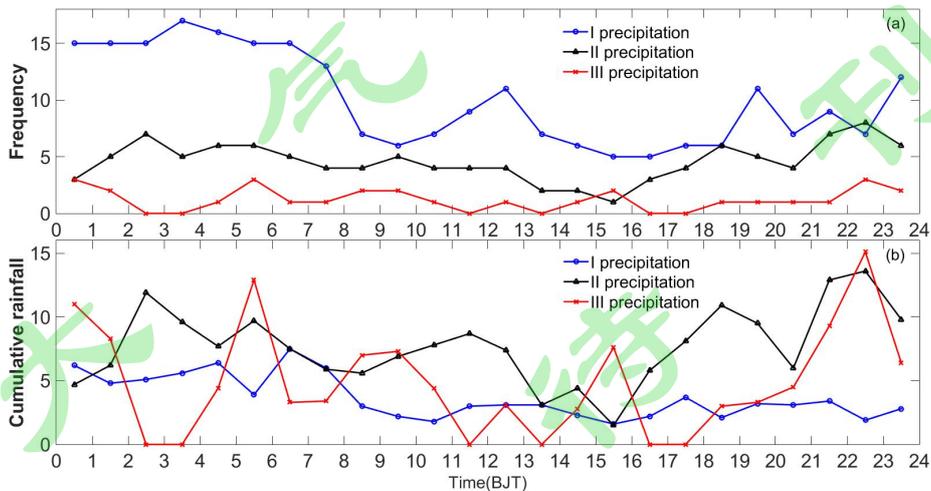


图4 各雨强 (a) 降雨频次、(b) 累积降雨量日变化

Fig.4 Diurnal variation of the (a) rainfall frequency、(b) cumulative rainfall of each rainfall intensity

3.2 降雨云日变化

云顶高可以反映降水系统对流活动的强弱，对流活动越强，云顶高越高。图 5 是降雨云顶高日变化箱型图，最高和最低点分别表示最大值和最小值，盒子上下横线分别为 75%和 25%百分位值，盒子中间的红线表示 50%百分位值。黑色虚线代表所有降雨云顶高中位值为 9.09 km（离地高度，下同）。图 5 可得云顶高最大值较为稳定，12:00-21:00 云顶高样本分布集中，21:00 至次日 12:00 云顶高变化范围较大。10:00 后云顶高中位值逐渐升高，12:00-21:00 云顶高中位值较高，基本在 9.5 km 左右并维持稳定。21:00 至次日 12:00 时段云顶高中位值较低，07:00-08:00 全天最低为 7.73 km。常祎和郭学良（2016）发现青藏高原那曲地区夏季降雨云顶高在午后至前半夜最高，与天山地区云顶高日变化趋势一致。

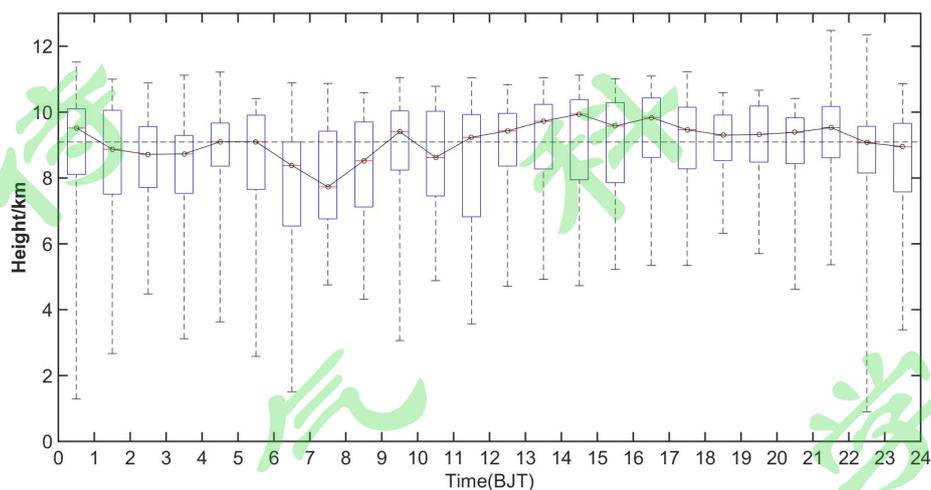


图 5 降雨云顶高的日变化箱型图

Fig.5 Box plot of diurnal variation of rainfall cloud top height

图 6 为不同时段 Z 的 NCFAD，由于 2 km 附近有零度层亮带，因此反射率因子突然增大。06:00-09:00 云顶高度最低（图 6c）。图 6d-h 显示了低层强反射率频率从增加到减小的发展过程，09:00-12:00 强反射率在低层出现的频率较低（图 6d），5 km 以下 15 dBZ 以上的反射率因子频率集中在 0.06% 以下。12:00-15:00 强反射率在低层逐渐增大（图 6c）。15:00-18:00 时段低层强反射率频率达到最大（图 6f），15 dBZ 以上的反射率因子频率在 0.08% 以上，分布在 2~5 km 和 0.21~2.5 km，相应的反射率因子集中在 16~25 dBZ 和 28~40 dBZ。18:00-21:00 和 21:00-24:00 低层强反射率频率逐渐减小。后半夜低层强反射率频率保持稳定（图 6a-b）。午后至傍晚云顶高较高是由于太阳辐射加热地表，并通过地表感热通量加热近地面大气，不稳定性增强，使得这段时间对流运动增强。常祎和郭学良（2016）研究 2014 年 7 月 1 日-8 月 31 日西藏那曲地区对流运动发现 11:00（当地时间）由局地热对流发展，经合并增长在 17:00-18:00 达到最强，与西天山地区最强对流出现在下午变化一致。由于雷达不同的观测模式造成了回波强度观测误差和灵敏度的变化也会导致统计结果在 3.8 km 处的突变，图 8 和图 10 也是同样的原因在 3.8 km 处产生突变。

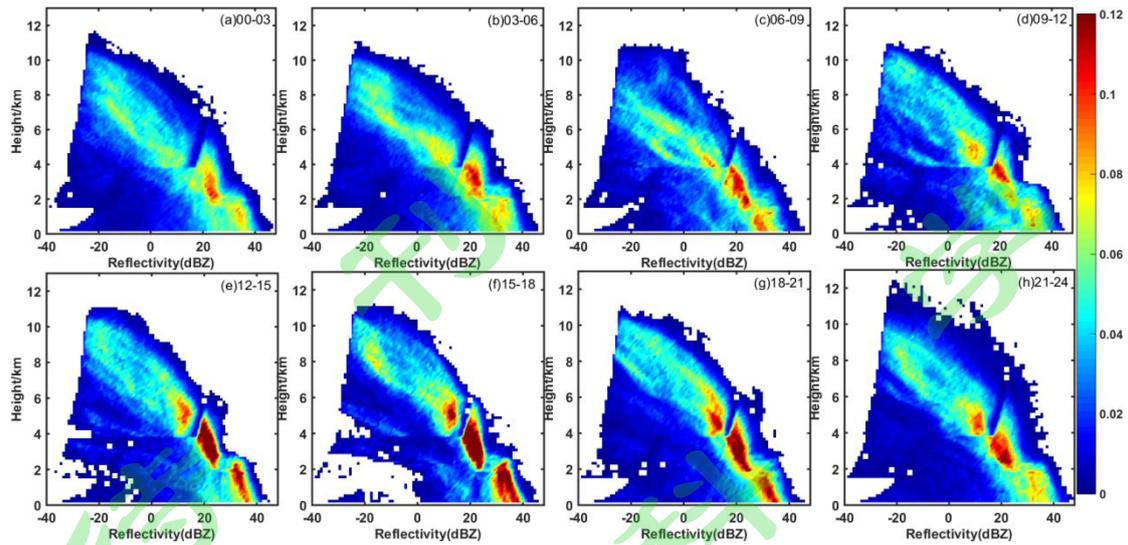


图 6 反射率因子在降雨期间 (a) 00:00-03:00、(b) 03:00-06:00、(c) 06:00-09:00、(d) 09:00-12:00、(e) 12:00-15:00、(f) 15:00-18:00、(g) 18:00-21:00、(h) 21:00-24:00 的归一化等高频率图

Fig.6 The reflectivity factor during the rainfall period (a) 00:00-03:00、(b) 03:00-06:00、(c) 06:00-09:00、(d) 09:00-12:00、(e) 12:00-15:00、(f) 15:00-18:00、(g) 18:00-21:00、(h) 21:00-24:00 Normalized Contoured Frequency by the Altitude Diagram

3.3 降雨云微观物理特征

图 7 是不同雨强的平均 Z 、平均 LWC 垂直廓线。由图 7 (a) 可知,小雨强 1.75~3.50 km 平均 Z 随着高度的降低而增加,1.50~1.75 km 平均 Z 随着高度的降低而减小,平均 Z 在 1.75 km 附近存在明显的向右弯曲,该高度平均 Z 的极大值为 27.75 dBZ,说明小雨强在 1.75 km 附近有明显的“亮带”结构;1.5 km 以下平均 Z 随着高度的降低而增加,0.21 km 处达到了最大值 30 dBZ。中雨强平均 Z 整体上随着高度的降低而增加,0.21 km 处达到了最大值 35.8 dBZ;2.5~3.0 km 高度范围平均 Z 增加速率明显大于其他高度,说明中雨强此范围粒子碰并增长效果较强。大雨强 9 km 以下平均 Z 随着高度降低逐渐增加,0.21 km 处达到了最大值 39.5 dBZ;2.5~3.5 km 高度范围平均 Z 增加速率明显大于其他高度,说明大雨强该范围粒子聚合碰并增长效果较强。多数情况下降雨强度越大,相对应的平均 Z 越大,但 3.5~4.4 km 中雨强与大雨强平均 Z 几乎相同,7.2~8.2 km 小雨强、中雨强、大雨强的平均 Z 几乎相等,11.6 km 以上小雨强和大雨强平均 Z 相差无几,中雨强的平均 Z 大于前两者;小雨强、中雨强、大雨强在高层中均有随着高度降低平均 Z 急剧增加后减小的现象,表明冰粒子先显著增加后由于聚合作用减少,小雨强、中雨强、大雨强出现该现象的范围分别为 10.5~11.5 km、11~13 km、9~11.5 km。

由于零度层以上的云是固态的,图 7 与图 9 液态水含量取 1.75 km 以下的云进行分析。图 7 (b) 表明小雨强、中雨强、大雨强 1.75 km 以下平均 LWC 随着高度变化的趋势与平均 Z 一致,随着高度的增加而减小。1.75 km 处小雨强、中雨强、大雨强平均 LWC 分别为 $1.12 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $2.28 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $2.93 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,0.21 km 处平均 LWC 小雨强为 $1.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,中雨强为 $4.2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,大雨强为 $7.3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

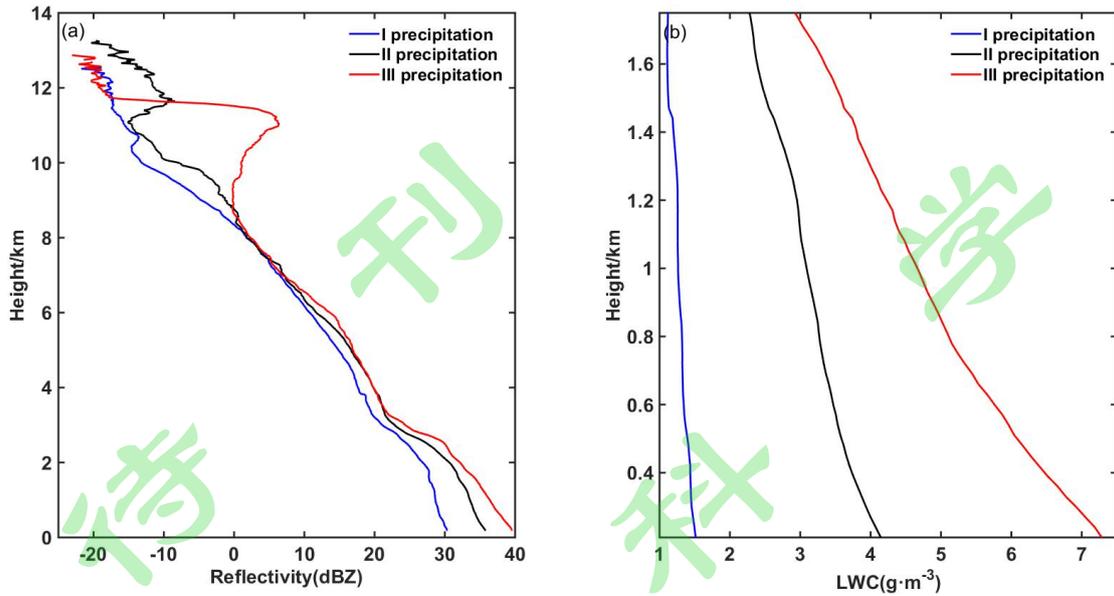


图 7 各雨强降雨云垂直廓线 (a) 平均反射率因子 (b) 平均液态含水量

Fig.7 Vertical profile (a) average reflectivity factor (b) average liquid water content of each heavy rain cloud

图 8、图 9、图 10 分别是小雨强、中雨强、大雨强降雨云 Z 、 LWC 、 V 的 NCFAD。小雨强 10 km 以上降雨云占总云的比例较小, Z 基本在 0 dBZ 以下, 主要集中在两个高度范围, 分别是 0.21~2.00 km、2.0~4.2 km, Z 主要集中在 24~32 dBZ、16~26 dBZ, Z 的最大值为 48 dBZ (图 8 (a))。中雨强 9 km 以上降雨云占总云的比例较小, Z 基本在 10 dBZ 以下, 主要集中在两个高度, 分别是 0.21~2.50 km、2.0~4.2 km, Z 主要集中在 29~38 dBZ、15~25 dBZ, Z 最大值为 46 dBZ (图 8 (b))。大雨强 9 km 以上降雨云占总云的比例较小, Z 基本在 5 dBZ 以下, 主要集中在两个高度, 分别是 0.21~2.50 km、2.0~4.4 km, Z 主要集中在 31~42 dBZ、16~26 dBZ, Z 最大值为 48 dBZ (图 8 (c))。小雨强、中雨强、大雨强 Z 归一化等频率高度图趋势一致, 但随着雨强的增加 Z 越集中。不同雨强 Z 都有两个集中区域, 高度较高的区域 Z 的大小与高度都差不多, 高度较低的区域 Z 的大小随着降雨强度增加而增加。西天山地区降雨云集中心区域 Z 值大于北京 (Zhang et al.,2019) 和东亚大陆区域 (Yin,2013)。北京 (Zhang et al.,2019) 降水云集中在 1~10 km, 反射率在 -20~10 dBZ。东亚大陆 (Yin,2013) 降水云集中在 8 km 以下, 雷达反射率在 -10~15 dBZ。

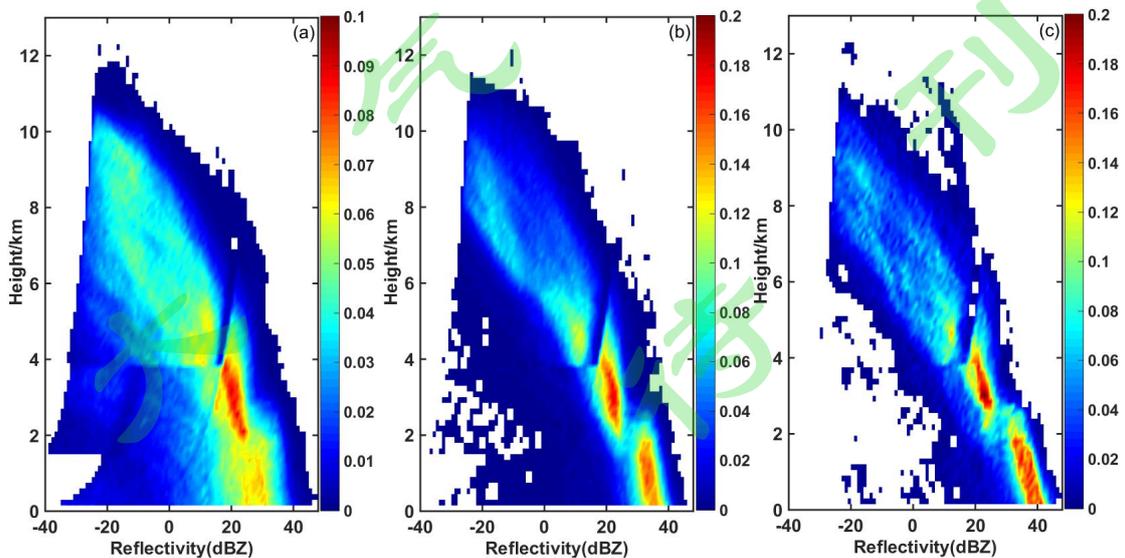


图 8 降雨云反射率因子归一化等频率高度图 (单位: %) (a) 小雨强 (b) 中雨强 (c) 大雨强

Fig.8 Rainfall cloud reflectivity factor (unit:%)(a) light rain intensity (b) moderate rain intensity (c) heavy rain intensity Normalized Contoured Frequency by the Altitude Diagram

1.75 km 以下小雨强 LWC 大多小于 $2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最大为 $15.2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 9a)。中雨强 LWC 大多小于 $5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最大为 $16.7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 9b)。大雨强 LWC 大多小于 $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最大为 $19.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 9c)。对比小、中、大雨强 LWC 归一化等高频率图可知, LWC 的范围随着雨强的增加而增加, 随着高度的降低而增加。中雨强和大雨强 1.75 km 以下 LWC 小于 $1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的频率明显少于小雨强, 这是由于中雨强和大雨强降雨量较大, 降雨量越大低层中 LWC 越大, 因此 LWC 在 $1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下的概率减小。

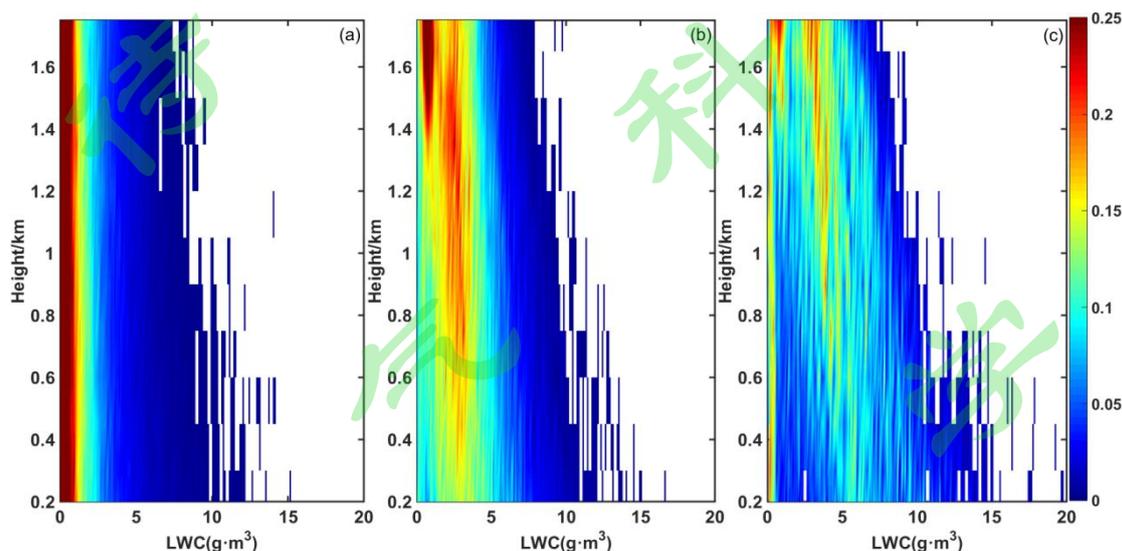


图 9 降雨云液态含水量归一化等频率高度图 (单位: %) (a) 小雨强 (b) 中雨强 (c) 大雨强

Fig.9 Rainfall cloud liquid water content (unit:%)(a) light rain intensity (b) moderate rain intensity (c) heavy rain intensity Normalized Contoured Frequency by the Altitude Diagram

径向速度 V 为正时表示粒子速度向上, 为负时表示粒子速度向下。由图 10 可知, 小雨强、中雨强、大雨强 V 在 2.0~9.5 km 集中在 $-0.3\sim-1.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 随着高度降低降水粒子的下降速度越大。2 km 以下表现出明显的向下运动, 可能是因为粒子在经过融化层后下落速度明显增大。0.21~2.00 km 小雨强、中雨强、大雨强 V 分别集中于 $-4.0\sim-5.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $-5\sim-7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $-5.0\sim-7.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对比小雨强、中雨强、大雨强 V 的归一化等频率高度图可知随着雨强的增加降雨粒子 V 越集中。

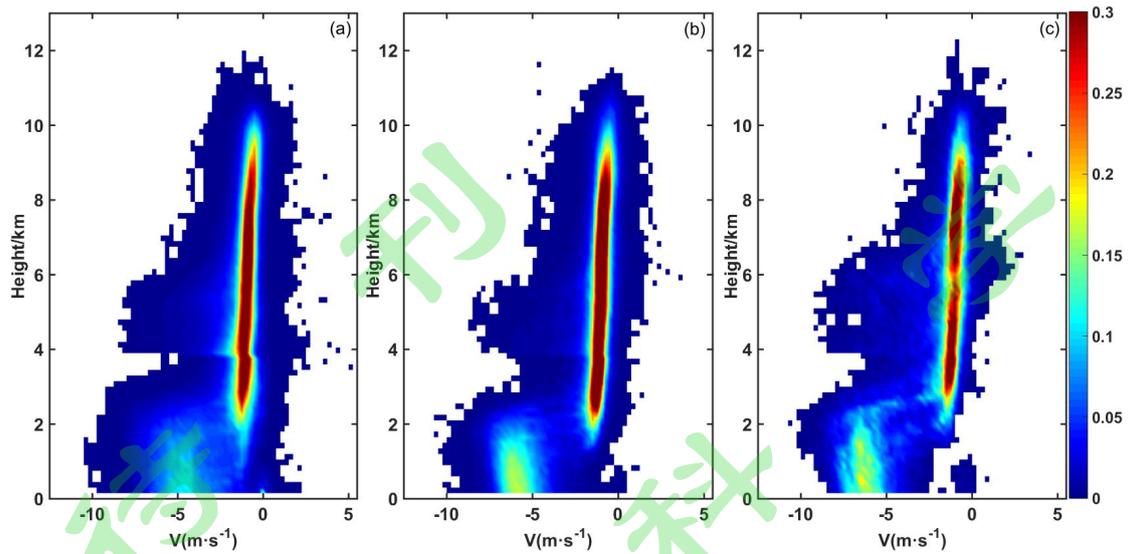


图 10 降雨云径向速度归一化等频率高度图 (单位: %) (a) 小雨强 (b) 中雨强 (c) 大雨强

Fig.10 Rainfall cloud radial velocity (unit:%)(a) light rain intensity (b) moderate rain intensity (c) heavy rain intensity Normalized Contoured Frequency by the Altitude Diagram

4 结论与讨论

本文基于毫米波云雷达和自动气象站逐小时降雨资料对伊犁河谷地区 2019 年和 2020 年 5-8 月共 8 个月的降雨以及降雨云日变化进行分析, 按照小时降雨量将降雨分为小雨强、中雨强、大雨强, 分析了这三类雨强的反射率因子 Z 、径向速度 V 、液态含水量 LWC 微物理特征。主要结论如下:

(1) 降雨主要发生在夜间, 累积降雨量集中在 21:00 至次日 07:00, 降雨频次和累积降雨量正相关, 相关系数为 0.71。22:00-23:00 降雨主要由中雨强引起的, 其余时段降雨主要由小雨强引起的。大雨强降雨频次最少, 但对总累积降雨量贡献大于小雨强。

(2) 小雨强、中雨强、大雨强粒子聚合碰并增长效果较强的高度分别为 1.8~2.8 km、1.6~2.5 km、2.5~3.5 km, 平均 Z 最大值分别为 30 dBZ、35.8 dBZ、39.5 dBZ, 最大平均 LWC 分别为 $1.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $4.2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $7.3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(3) 雨强越大 Z 的集中度越高, 不同雨强 Z 都有两个集中区域, 较高集中区域 Z 集中在 15~26 dBZ 高度范围为 2.0~4.4 km; 小雨强、中雨强、大雨强较低集中区域 Z 分别集中在 24~32 dBZ、29~38 dBZ、31~42 dBZ。 LWC 的范围随着雨强的增加而增加, 随着高度的降低而增加。中雨强和大雨强 1.75 km 以下 LWC 小于 $1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的频率明显少于小雨强。降水粒子的下降速度随着高度的降低而增大, 雨强的越大降雨粒子 V 越集中。

许多学者对其他地区降雨云进行了一些类似的研究, 结果与中国西天山地区有异同。如常祎和郭学良 (2016) 发现青藏高原那曲地区夏季降雨云顶高在午后至前半夜最高, 与天山地区云顶高趋势一致。西天山区地区降雨云反射率因子最大值和集中区域反射率因子大于北京 (Zhang et al., 2019) 和东亚大陆区域 (Yin, 2013)。本文利用云雷达资料对西天山地区 2019 年和 2020 年 5-8 月共 8 个月降雨云进行日变化和宏微物理特征分析, 加深了对西天山地区降雨云的认识, 为进一步认识新疆西天山地区降雨云的结构特征提供了数据依据。但该研究仅用了两年的云雷达数据, 且仅应用 Z 、 V 、 LWC 、夏季降雨云宏微物理特征开展分析, 后期可结合更多的微物理量如粒子半径、粒子数浓度对西天山区云特征进行更深入分析。另需要说明的是云雷达对应强降水观测, 即使进行了衰减订正, 回波强度的垂直变化等也会有明显的误差, 原因包括: 回波强度本身存在的系统偏差, K - Z 关系的差别等。

参考文献

- Ackerman T P, Stokes G M. 2003. The atmospheric radiation measurement program [J]. *Phys. Today*, 56(1), 38-44.
- Atlas, David. 1954. The estimation of cloud parameters by radar [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 11(4):309-317.
- Baedi R J P, Dewit J J M, Russchenberg H W J, et al. 2000. Estimating effective radius and liquid water content from radar and lidar based on the CLARE98 data-set [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(10-12):1057-1062.
- Bu L B, Pan H L, Kumar K R, et al. 2016. Lidar and millimeter-wave cloud radar (MWCR) techniques for joint observations of cirrus in Shouxian (32.56 °N, 116.78 °E), China [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 148:64-73.
- 常祎, 郭学良. 2016. 青藏高原那曲地区夏季对流结构及雨滴谱分布日变化特征[J]. *科学通报*, 61(15):1706-1720. Chang Yi, Guo Xueliang. 2016. Characteristics of convective cloud and precipitation during summer time at Naqu over Tibetan Plateau [J]. *Science China Press (in Chinese)*, 61(15):1706-1720.
- Chen S S, Kerns B W, Guy N, et al. 2016. Aircraft observations of dry air, the ITCZ, convective cloud systems, and cold pools in MJO during DYNAMO[J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 97, 405-423.
- 陈羿辰, 金永利, 丁德平, 等. 2018. 毫米波测云雷达在降雪观测中的应用初步分析 [J]. *大气科学*, 42(1):134-149. Chen Yichen, Jin Yongli, Ding Deping, et al. 2018. Preliminary analysis on the application of millimeter wave cloud radar on snow observation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42 (1): 134-149.
- Fu Y, Lin Y, Liu G, et al. 2003. Seasonal characteristics of precipitation in 1998 over East Asia as derived from TRMM PR [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 20(4):511-529.
- Guo J P, Liu H, Li Z Q, et al. 2018. Aerosol-induced changes in the vertical structure of precipitation: a perspective of TRMM precipitation radar [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 18(18): 13329-13343.
- Harrison E F, Minnis P, Barkstrom B R, et al. 1990. Seasonal variation of cloud radiative forcing derived from the earth radiation budget experiment [J]. *Geophys. Res.*, 95, 18687-18703.
- Huang W, Chang S Q, Xie C L, et al. 2017. Moisture sources of extreme summer precipitation events in North Xinjiang and their relationship with atmospheric circulation [J]. *Advances in Climate Change Research*, 8(1):12-17.
- 黄秋霞, 赵勇, 何清. 2015a. 新疆伊犁河谷夏季降水日变化特征 [J]. *冰川冻土*, 37(2):369-375. Huang Qiuxia, Zhao Yong, He Qing. 2015a. The daily variation characteristics of summer precipitation over the Yili River Vally, Xinjiang [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 37(2):369-375.
- 黄秋霞, 赵勇, 何清, 等. 2015b. 伊宁市主汛期降水日变化特征 [J]. *干旱区研究*, 32(04):743-747. Huang Qiuxia, Zhao Yong, He Qing, et al. 2015b. Daily variations characteristics of rainfall in flood season in Yining City [J]. *Arid Zone Research (in Chinese)*, 32(04):742-747.
- 黄钰, 郭学良, 毕凯, 等. 2020. 北京延庆山区降雪云物理特征的垂直观测和数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 44(2): 356-370. HUANG Yu, GUO Xueliang, BI Kai, et al. 2020. Vertical observation and numerical simulation of the clouds physical characteristics of snow-producing

- over Yanqing Mountain Area in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(2): 356-370.
- Krasnov O A, Russchenberg H W J . 2005. A synergetic radar-lidar technique for the LWC retrieval in water clouds: Description and application to the CloudSat data [C]. Preprints of 32nd Conf. of Radar Meteorology Albuquerque, NM, AMS R. 11.
- 李海飞, 乐满, 杨飞跃, 等. 2017. 基于地基云雷达资料的淮南地区冬季云宏观特征 [J]. 干旱气象, 035(6): 1011-1014. LI Haifei, YUE Man, YANG Feiyue, et al. 2017. Analysis on macroscopic characteristics of winter cloud in Huainan Area of Anhui based on ground-based cloud radar data [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 035(6): 1011-1014.
- 李海飞. 2018. 基于地基云雷达资料的淮南地区云宏观特征研究 [D]. 兰州大学硕士学位论文. P:9-11. Li Haifei. 2018. Macroscopic and microscopic characteristics of clouds based on ground-based cloud radar data in Huainan Area, China [D]. M.S. thesis (in Chinese), Lanzhou University.
- 马宁堃, 刘黎平, 郑佳锋. 2019. 利用 Ka 波段毫米波雷达功率谱反演云降水大气垂直速度和雨滴谱分布研究 [J]. 高原气象, 38(2): 325-339. Ma Ningkun, Liu Liping, Zheng Jiafeng. 2019. Application of doppler spectral density data in vertical air motions and drop size distribution retrieval in cloud and precipitation by Ka-band millimeter radar [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 38(2): 325-339.
- Parish T R, Leon D. 2013. Measurement of cloud perturbation pressures using an instrumented aircraft [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 30(2), 215-229.
- Pavlos, Kollias, Jasmine, et al. 2011. Cloud radar doppler spectra in drizzling stratiform clouds: 1. Forward modeling and remote sensing applications [J]. Journal of Geophysical Research, 116(D13).
- 彭亮, 陈洪滨, 李柏. 2012. 3mm 多普勒云雷达测量反演云内空气垂直速度的研究 [J]. 大气科学, 36(1): 1-10. Peng Liang, Chen Hongbin, Li Bai. 2012. A case study of deriving vertical air velocity from 3-mm cloud radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(1): 1-10.
- Qiu Y, Lu C, Luo S. 2018. Tibetan Plateau cloud structure and cloud water content derived from millimeter cloud radar observations in summer [J]. Pure and Applied Geophysics, 176(4): 1785-1796.
- Reddy N N, Ratnam M V, Basha G, et al. 2018. Cloud vertical structure over a tropical station obtained using long-term high-resolution radiosonde measurements [J]. Atmos. Chem. Phys., 18(16), 11709-11727.
- Shupe M D . 2007. A ground-based multisensor cloud phase classifier [J]. Geophysical Research Letters, 34(22).
- Stephens, Graeme L. 2005. Cloud feedbacks in the climate system: A critical review [J]. Journal of Climate, 18(2): 237-273.
- Villalobos-Puma E, Martinez-Castro D, Flores-Rojas J L, et al. 2019. Diurnal cycle of raindrop size distribution in a valley of the Peruvian Central Andes [J]. Atmosphere, 11(1): 38.
- 汪会, 郭学良. 2018. 青藏高原那曲地区一次深对流云垂直结构的多源卫星和地基雷达观测对比分析 [J]. 气象学报, 76(6): 996-1013. Wang Hui, Guo Xueliang. 2018. Comparative analyses of vertical structure of a deep convective cloud with multi-source satellite and ground-based radar observational data at Naqu over the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 76(6): 996-1013.

- 王柳柳,刘黎平,余继周,等.2017.毫米波云雷达冻雨-降雪微物理和动力特征分析 [J].气象,43(12):1473-1486. Wang Liuliu, Liu Liping, Yu Jizhou, et al. 2017. Microphysics and dynamic characteristic analysis of freezing rain and snow observed by millimeter-wave radar [J]. Meteorological Monthly (in Chinese),43(12):1473-1486.
- 王振会,滕煦,纪雷.2011.球形粒子毫米波 k-Z 关系研究 [J].气象学报, 69(6):1020-1028. Wang Zhenhui, Teng Xu, Ji Lei. 2011. A study of the relationship between the attenuation coefficient and radar reflectivity factor for spherical particles in clouds at millimeter wavelengths [J]. Acta Meteorologica Sinica, 69(6):1020-1028.
- 吴翀,刘黎平,翟晓春.2017. Ka 波段固态发射机体制云雷达和激光云高仪探测青藏高原夏季云底能力和效果对比分析 [J]. 大气科学, 41(4):659-672. Wu Chong, Liu Liping, Zhai Xiaochun. 2017. The comparison of cloud base observations with Ka-band solid-state transmitter-based millimeter wave cloud radar and ceilometer in summer over Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (4): 659-672.
- Wielicki B A , Cess R D , King M D , et al. 1995. Mission to planet earth: Role of clouds and radiation in climate [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 76(11):2125-2153.
- 杨莲梅,李霞,张广兴.2011.新疆夏季强降水研究若干进展及问题 [J].气候与环境研究,16(2):188-198. Yang Lianmei, Li Xia, Zhang Guangxing. 2011. Some advances and problems in the study of heavy rain in Xinjiang [J]. Climatic and Environmental Research(in Chinese), 16 (2) :188-198.
- Yi M. 2019. Differences in cloud vertical structures between the Tibetan Plateau and Eastern China Plains during rainy season as measured by CloudSat/CALIPSO [J]. Advances in Meteorology, (6):1-11.
- Yin J, Wang D, Zhai G, et al. 2013. Observational characteristics of cloud vertical profiles over the continent of East Asia from the CloudSat data [J]. ACTA METEOROLOGICA SINICA, 027(1):26-39.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等.2006.多普勒天气雷达原理与业务应用 [M]. 北京:气象出版社. 31. Yu Xiaoding, Yao Xiuping, Xiong Yannan, et al. 2006. Principle and application of Doppler weather radar (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 31.
- Yuter S E, Houze R A. 1995. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part II : Frequency distributions of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity [J]. Mon. Wea. Rev., 123(7):1921-1940.
- 曾勇,周玉淑,杨莲梅.2019.新疆西部一次大暴雨形成机理的数值模拟初步分析 [J]. 大气科学, 43(2): 372-388. Zeng Yong, Zhou Yushu, Yang Lianmei. 2019. A preliminary analysis of the formation mechanism for a heavy rainstorm in western Xinjiang by numerical simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (2): 372-388.
- Zeng Y, Yang L M, Zhang Z Y, et al. 2020a. Characteristics of clouds and raindrop size distribution in Xinjiang, using cloud radar datasets and a disdrometer [J]. Atmosphere, 11(12), 1382.
- Zeng Y, Yang L M. 2020b. Triggering mechanism of an extreme rainstorm process near the Tianshan Mountains in Xinjiang, an Arid Region in China, based on a numerical simulation [J]. Advances in Meteorology, vol. 2020(4):1-12.
- Zeng Y, Yang L , Tong Z P , et al. 2020c. Application of multiple detection data in the analysis of snowstorm processes in Xinjiang during the Central Asia extreme precipitation observation test (CAEPOT) [J]. Advances in Meteorology, 2020(3):1-13.

- Zeng Y, Yang L M , Tong Z P , et al. 2021. Statistical characteristics of raindrop size distribution during rainy seasons in Northwest China [J]. *Advances in Meteorology*, 2021:1-12.
- 张晋茹, 杨莲梅. 2019. 基于毫米波云雷达的伊犁河谷两次强降雪过程云特征观测分析 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 13(5): 41-48.
- Zhang Jinru, Yang Lianmei. 2019. Observation and analysis of cloud characteristics in two heavy snowfall processes in Ili River Valley based on millimeter wave cloud radar [J]. *Desert and Oasis Meteorology(in Chinese)*,13(5):41-48.
- Zhang Y , Zhou Q , Lv S , et al. 2019. Elucidating cloud vertical structures based on three-year Ka-band cloud radar observations from Beijing, China [J]. *Atmospheric Research*, 222:88-99.
- Zhao C , Liu L , Wang Q , et al. 2016. Toward understanding the properties of high ice clouds at the Naqu Site over the Tibetan Plateau using ground-based active remote sensing measurements obtained during a short period in July 2014 [J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 55(11): 2493-2507.
- Zheng J, Liu L, Chen H. et al. 2019. Characteristics of warm clouds and precipitation in South China during the pre-flood season using datasets from a cloud radar, a ceilometer, and a disdrometer [J]. *Remote Sens.*, 11, 3045.
- Zhou C , Zelinka M D , Klein S A. 2016. Impact of decadal cloud variations on the Earth's energy budget [J]. *Nature Geoscience*, 9(12):871-874.