暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

三波长拉曼–米散射激光雷达对武汉地区卷云的探测个例研究

秦建峰 曹宇坤 涂明 高宗江

A case study of cirrus cloud over Wuhan city based on three-wavelength Raman-Mie lidar

QIN Jianfeng，CAO Yukun，TU Ming，GAO Zongjiang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024–075

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

地基多波长雷达垂直探测云降水微物理特征研究进展
Research progress in profiling cloud and precipitation microphysics characteristic with ground-based multi-frequency radars
暴雨灾害. 2023, 42(4): 361–371 https://doi.org/10.12406/byzh.2023–075

基于一次暴雨过程的风云四号A星三种云参数应用效果对比分析
Comparative analysis of application effects of three cloud parameters of FY-4A in a rainstorm case
暴雨灾害. 2022, 41(4): 396–404 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004–9045.2022.04.004

毫米波云雷达观测和反演云降水微物理及动力参数方法研究进展
Reviews on retrieval methods for microphysical and dynamic parameters with cloud radar
暴雨灾害. 2021, 40(3): 231–242 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004–9045.2021.03.002

深度学习模型对武汉地区雷达回波临近预报的检验评估
Examination and evaluation of deep learning models for radar echo nowcasting in Wuhan area
暴雨灾害. 2022, 41(4): 458–466 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004–9045.2022.04.010

2021年苏州与武汉两地龙卷的环境条件与雷达特征对比分析
Comparative analysis of environmental conditions and radar characteristics for two tornadoes occurred in Suzhou and Wuhan in 2021
暴雨灾害. 2023, 42(4): 415–426 https://doi.org/10.12406/byzh.2023–044

2021年5月武汉两次对流性大风天气的多普勒雷达观测分析
Doppler radar observation and analysis of two convective gale weather events in Wuhan in May 2021
暴雨灾害. 2022, 41(2): 119–129 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004–9045.2022.02.002

关注微信公众号，获得更多资讯信息

秦建峰,曹宇坤,涂明,等.2025.三波长拉曼-米散射激光雷达对武汉地区卷云的探测个例研究[J].暴雨灾害,44(4):483−490. QIN Jianfeng, CAO Yukun, TU Ming, et al. 2025. A case study of cirrus cloud over Wuhan city based on three-wavelength Raman-Mie lidar [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):483−490 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−075

三波长拉曼−米散射激光雷达对武汉地区卷云的探测个例研究

秦建峰[1], 曹宇坤[2], 涂明[1], 高宗江[2]

(1. 湖北省武汉市气象局, 武汉 430040; 2. 无锡中科光电技术有限公司, 无锡 214028)

摘　要: 为识别卷云光学特征, 为武汉地区大气云层探测研究提供数据支撑及科学参考, 基于 2023 年 10—12 月武汉国家基本气象站三波长拉曼-米散射激光雷达的连续探测资料, 选取武汉地区 2023 年 11 月一次典型卷云过程为例进行卷云粒子的光学参数特征分析。结果表明: 此次卷云过程中卷云平均云底高度为 7.0 km, 并呈现夜间缓慢降低、白天逐渐升高的变化趋势, 期间 355 nm、532 nm 波长的平均雷达比分别为 40.6 Sr 和 59.3 Sr。结合后向散射系数和退偏振比识别卷云粒子相态, 过程中云底和云顶三个波长间后向散射系数差异小, 且退偏振比在 0.35 以上, 以非球形大粒子为主, 而云内 355 nm 和 532 nm 波长的后向散射系数明显高于 1 064 nm, 且退偏振比较小, 多为球形小粒子, 云团自下而上表现出冰晶-过冷水-冰晶的结构分布特征。较薄和较厚卷云的后向散射系数颜色比多分布在 0.5~0.8, 其中 1 064 nm 和 355 nm 波长的颜色比因厚度影响存在差异。

关键词: 激光雷达; 卷云; 光学参数; 武汉地区

中图法分类号: P412.25　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−075

A case study of cirrus cloud over Wuhan city based on three-wavelength Raman-Mie lidar

QIN Jianfeng[1], CAO Yukun[2], TU Ming[1], GAO Zongjiang[2]

(1. *Wuhan Meteorological office of Hubei Province*, *Wuhan* 430040; 2. *Wuxi Cas Photonics Inc*, *Wuxi* 214028)

Abstract: To identify the optical characteristics of cirrus clouds and provide data support and scientific reference for atmospheric cloud detection research in Wuhan area, this study analyzed the optical parameter characteristics of convolutional cloud particles of a typical cirrus event in Wuhan in November 2023 based on the continuous observation data from a three-wavelength Raman-Mie lidar at Wuhan National Basic Meteorological Station from October to December 2023. The results are as follows. The average cloud base height of cirrus during this event was 7.0 km, and it showed a trend of slowly decreasing at night and gradually increasing during the daytime. During this period, the average lidar ratios at wavelengths of 355 nm and 532 nm were 40.6 Sr and 59.3 Sr, respectively. The phases of cirrus particles were identified by combining the backscattering coefficient and depolarization ratio. Small differences in backscattering coefficients across the three wavelengths at the cloud base and the cloud top were found, and the depolarization ratios were above 0.35, suggesting the dominance of non-spherical large particles during this event. However, the backscattering coefficients at wavelengths of 355 nm and 532 nm in the cloud were significantly higher than at 1064 nm with smaller depolarization ratios, indicating more spherical small particles in the cloud. The vertical structure of the cirrus showed an ice crystal-supercooled water-ice crystal distribution characteristic from the bottom to the top. The backscattering coefficient color ratios of both thinner and thicker cirrus clouds predominantly range from 0.5 to 0.8, with partial differences in the color ratio of 1064 nm and 355 nm wavelengths due to the influence of cloud thickness.

Key words: lidar; cirrus cloud; optical parameter; Wuhan region

引　言

云对水循环和地气辐射平衡具有重要影响 (傅云飞, 2018; 柳英等, 2024; 张正国等, 2024), 在天气和气候变化中有着举足轻重的作用 (Zhang et al., 2017;

收稿日期: 2024−01−06; **定稿日期**: 2024−12−13

资助项目: 2023 年度武汉市气象科技联合项目 (2023020201010575, 2023020201010580)

第一作者: 秦建峰, 主要从事大气探测与遥感技术研究。E-mail: peak1980@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

Ge et al., 2018; 王秀萍等, 2023), 且云层的变化与夹卷湍流、地形动热力等因素关系密切 (陆春松和徐晓齐, 2021; 田磊等, 2023; 汪天怡等, 2024)。卷云作为对流层中最高的云, 通过反射、散射等方式与太阳短波辐射、地气长波辐射相互作用 (Wang et al., 2024), 其对于大气的保温作用在地气交换系统中有着至关重要的影响 (Zhang et al., 2013; 张华等, 2017)。一般而言, 卷云大多由形态各异的大小冰晶粒子构成 (Mitchell et al., 2018), 卷云的光学性质一定程度上可反应冰晶粒子分布及形态, 这为揭示卷云内部特征, 以及进一步确定卷云的辐射效应提供了重要理论基础, 因此对于卷云光学特性分析已逐渐成为气象学关注的研究方向 (Hong et al., 2007; Mao et al., 2010)。

激光雷达因时空分辨率高、探测距离远 (赵虎等, 2015), 且可通过反演获取的消光系数、后向散射系数等参量对云层高度、内部粒子形态进行研究 (张清泽等, 2012), 在卷云特性探测领域应用广泛。目前国内外基于激光雷达对卷云特性的研究主要集中在气溶胶光学厚度、云团高度、雷达比和后向散射系数颜色比等方面 (Beyerle et al., 2001; Vaughan et al., 2010)。雷达比作为气溶胶粒子光学散射特性的一个重要参数, 与探测粒子形状和高宽比密切相关。Sakai 等 (2003) 利用单波长气溶胶激光雷达测得日本上空卷云雷达比为 17±14 Sr。Immler 等 (2007) 探测到对流层之上热带卷云雷达比较中纬度卷云明显偏高, 可达 26±7 Sr。薛新莲等 (2006) 在对合肥地区卷云的研究中发现, 合肥地区 8—11 km 高度卷云的雷达比大致为 30±9 Sr, 且有明显的季节变化特征; 季承荔等 (2016) 在对合肥上空卷云有效激光雷达比的研究中发现了相似规律, 三个波长的有效雷达比伴随时间推移呈现较为显著的季节变化。此外, 后向散射系数颜色比因其可以反映探测目标粒子的尺度大小, 也是激光雷达探测卷云的重要研究方向。狄慧鸽等 (2014) 利用三波长米散射激光雷达对西安大气的探测研究发现, 云层中 532 nm 和 355 nm 波长的后向散射系数颜色比大于 1, 说明云层中粒子半径较大。陶宗明等 (2013a) 提出了一种用衰减的后向散射系数颜色比估算真实的后向散射系数颜色比的反演方法, 并探测发现合肥上空卷云粒子在 532 nm 和 1 064 nm、355 nm 和 532 nm、355 nm 和 1 064 nm 波长上的颜色比峰值频率分别位于 0.9、0.7、0.6 附近。潘昱冰等 (2015) 利用双波长激光雷达对格尔木地区上空卷云的探测发现, 该地区卷云后向散射系数颜色比集中在 0.8~0.9。

以上研究表明, 激光雷达是获取卷云光学参数特征的重要手段, 但基于激光雷达的卷云光学参数的研究结论在不同时间、不同地区间不尽相同。武汉作为我国中部地区的中心城市, 高空卷云的发展直接影响局地的热力状况和水循环, 同时其天气演变对长江中下游地区天气的发生发展还具有指示性与传导性影响。因此本文利用武汉地区 2023 年 10—12 月三波长拉曼-米散射激光雷达 (以下简称拉曼-米雷达) 数据, 反演计算卷云雷达比、后向散射系数颜色比等光学参量, 并筛选典型卷云个例, 分析该地区卷云云团光学特征, 以期为武汉地区大气云层探测研究提供数据支撑及科学参考。

1 设备、数据和方法

1.1 设备简介

武汉拉曼-米雷达由无锡中科光电技术有限公司生产, 型号为 YLJ1, 布设于武汉国家基本气象站 (114.05° E, 30.60° N, 海拔 23.6 m) (图 1), 于 2023 年 9 月正式开始观测。该站点位于武汉城区以外的西部郊区, 毗邻农田, 因人为活动产生的气溶胶浓度相对较低, 有利于开展高空卷云探测。

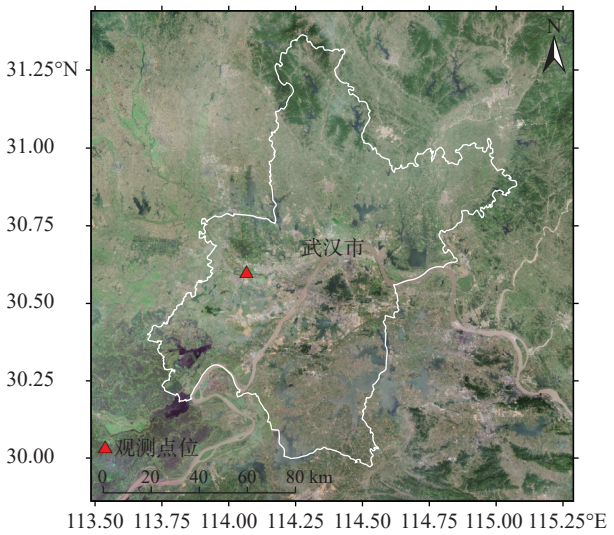


图 1 武汉地区拉曼-米雷达探测点位

Fig. 1 Raman-Mie lidar observation location in the Wuhan area

拉曼-米雷达技术路线如图 2 所示, 激光发射器向大气中发射 355 nm、532 nm、1 064 nm 波长探测激光, 每一发激光脉冲均被传输路径上的水汽分子、大气颗粒物或云散射, 大气后向散射光被接收望远镜接收, 依次通过小孔光阑和准直透镜以后变成平行光。由分光镜把三个波长的回波信号分离, 分别进入对应探测通道, 进行模数转换。波长 355 nm 紫外回波信号 P 偏振、S 偏振及其对应的拉曼散射信号 386 nm、407 nm 经过滤光片后, 进入光电倍增管

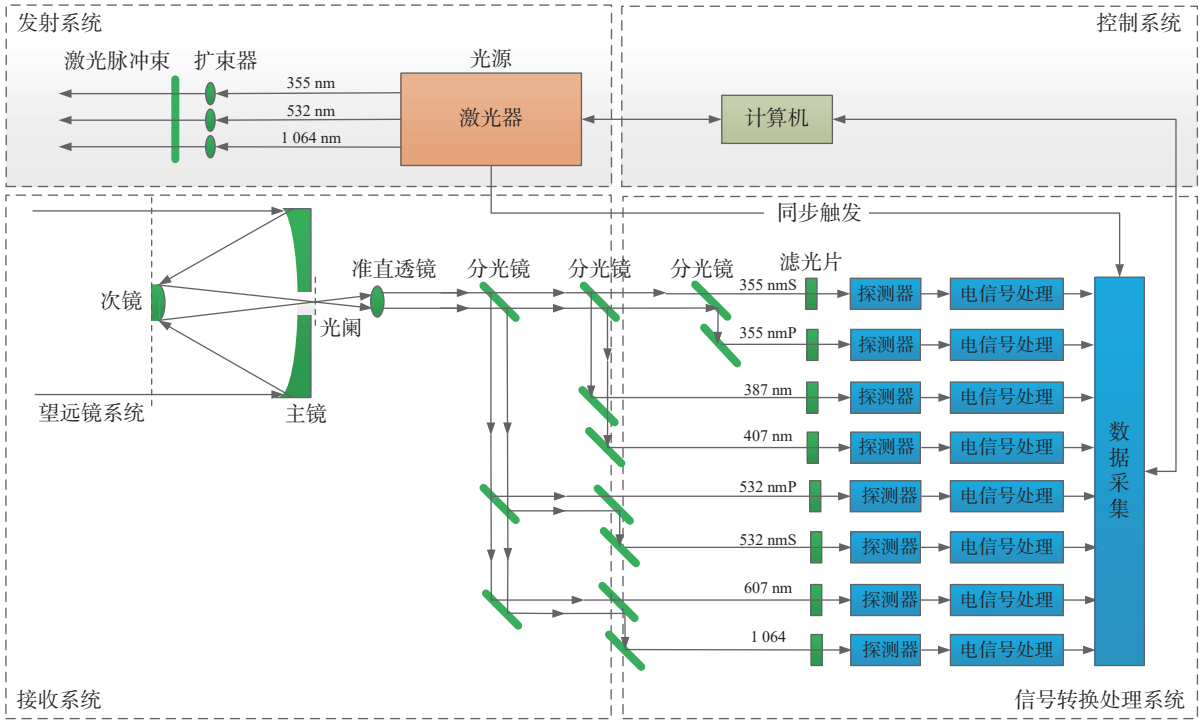


图 2 YLJ1 型拉曼-米雷达系统技术路线

Fig. 2 Technical route of YLJ1 Raman-Mie lidar system

(Photomultiplier Tube, PMT) 转换为电信号; 波长 532 nm 回波信号被检偏棱镜分成两束, 一束为垂直分量, 另一束为平行分量, 垂直分量经过滤光片后直接进入 PMT, 其对应的拉曼散射信号 607 nm 经过滤光片后, 进入 PMT 转换为电信号; 波长 1 064 nm 回波信号进入雪崩光电二极管 (Avalanche Photo Diode, APD) 转换为电信号, 经过放大器放大后对数据实时显示和存储。本次探测所用拉曼-米雷达系统参数指标如表 1 所示。

表 1 YLJ1 型拉曼-米雷达系统参数指标

Table 1 Parameter indicators of the Raman-Mie lidar system

类别	参数	指标
性能指标	时间分辨率	1 min
	空间分辨率	7.5 m
	最大有效探测范围	≥10 km
	激光器	Nd : YAG固体激光器
	激光波长	355 nm/532 nm/1 064 nm
发射单元	平均功率(单个波长)	≥0.5 W (355 nm) ≥1 W (532 nm) ≥1 W (1 064 nm)
接收单元	发散角	≤1 mrad
	发射激光的偏振比	≥100 : 1
	望远镜口径	≥300 mm
	光路设计	卡塞格林反射式
	视场角	≤2 mrad
	探测器	PMT/APD
	数据采集器采样频率	≥ 10 MHz

1.2 数据与方法

武汉拉曼-米雷达在 2023 年 10—12 月连续探测, 无数据中断。其中 11 月 2 日 17 时—3 日 17 时 (北京时, 下同) 探测到一次卷云过程, 期间云底高度均在 6.0 km 以上, 且云团持续时间长, 可作为卷云典型个例。本文用于分析卷云过程的拉曼-米雷达数据产品包括后向散射系数 (355 nm、532 nm、1 064 nm 波长)、退偏振比 (532 nm 波长) 和雷达比 (355 nm、532 nm 波长)。

拉曼-米雷达基于设备接收的米散射信号与拉曼散射信号对消光系数、后向散射系数等光学参量进行进一步反演。米散射信号与拉曼散射信号的雷达方程 (Ansmann et al., 1992) 可分别表示为

$$P(\lambda_0,h)=P_0C_0O(h)\frac{(\beta_{\mathrm{m}}(\lambda_0,h)+\beta_{\alpha}(\lambda_0,h))}{h^2}\exp\left\{-2\int_0^h[\alpha_{\alpha}(\lambda_0,\xi)+\alpha_{\mathrm{m}}(\lambda_0,\xi)]\,\mathrm{d}\xi\right\}\quad(1)$$

$$P(\lambda_{\mathrm{N}},h)=P_0\frac{C_{\mathrm{N}}O(h)}{h^2}\beta(\lambda_{\mathrm{N}},h)\exp\left\{-\int_0^h[\alpha_{\alpha}(\lambda_0,\xi)+\alpha_{\mathrm{m}}(\lambda_0,\xi)+\alpha_{\alpha}(\lambda_{\mathrm{N}},\xi)+\alpha_{\mathrm{m}}(\lambda_{\mathrm{N}},\xi)]\,\mathrm{d}\xi\right\}\quad(2)$$

其中, λ_0 为激光雷达的发射波长, λ_{N} 为氮气分子的振

动拉曼散射波长，$P(\lambda, h)$ 为雷达接收的垂直高度 h 处的散射信号强度；C_0 和 C_N 分别为米散射和拉曼散射通道的系统常数；$O(h)$ 为雷达系统的几何重叠因子；$\alpha(\lambda, \xi)$ 和 $\beta(\lambda, h)$ 分别为垂直距离 ξ 处所对应的消光系数和垂直距离 h 处对应的后向散射系数，下标 α 和 m 分别表示大气气溶胶和空气分子。

在针对卷云的分析中，由于卷云云团的消光系数和后向散射系数在数值上明显大于大气分子和气溶胶，雷达方程可作相应调整和简化 (陶宗明等，2013b)。后向散射系数体现大气粒子向雷达方向的散射能力 (黄忠伟等，2022)，可用来分析卷云粒子的几何特性，同时由于不同波长与卷云粒子发生作用时穿透能力不同，波长越长，穿透性越强，监测到的卷云粒径越大。因此，引入后向散射系数颜色比 (X) 来反映卷云粒子的尺度分布，计算公式 (刘东等，2013) 如下

$$X = \frac{\beta_{\lambda_1}}{\beta_{\lambda_2}} \tag{3}$$

当 $\lambda_1 > \lambda_2$ 时，较大的后向散射系数颜色比表示卷云粒子尺寸偏大。

退偏振比 ($\delta(h)$) 是可由雷达直接探测得到的重要光学参数，其大小与大气粒子粗糙度成正比，在卷云中退偏振比数值越趋近于 1，卷云粒子越趋近于固态冰晶，反之则表示卷云粒子越趋近于液态水滴 (Wang et al., 2020)，计算公式为

$$\delta(h) = k\frac{P_s(h)}{P_p(h)} \tag{4}$$

其中，$P_s(h)$ 和 $P_p(h)$ 分别为雷达接收的回波功率的平行分量和垂直分量；k 为两通道的增益比，即标定因子。

雷达比为消光系数和后向散射系数的比值。在卷云云团中雷达比受卷云粒子的组分、大小、形状与湿度等因子影响 (黄忠伟等，2022)，可综合表征卷云粒子的吸收特性。

此外，使用云顶和云底高度分析卷云过程中云层发展的宏观变化特征。激光雷达计算云顶和云底高度借助于微分求导方法，利用后向散射信号 (P) 随高度变化 $\mathrm{d}P(h)/\mathrm{d}(h)$ 的正负性作为判别条件，即 $\mathrm{d}P(h)/\mathrm{d}(h)$ 由负变为正的突变高度为云底高度，而由正变为负时的突变高度为云顶高度 (Chen et al., 2002)。

2 结果分析

2.1 卷云高度特征

图 3 为 2023 年 11 月 2 日 17 时—3 日 17 时武汉拉曼-米雷达不同波长探测的卷云云底及云顶高度。可以看出，三个波长反演得到的云底高度较为一致，平均高度维持在 7.0 km 左右。伴随卷云云团的发展，云底高度随时间表现为先缓慢降低再逐渐升高的变化趋势。三个波长反演计算得到的云顶高度存在差异，主要表现为 355 nm 和 1 064 nm 波长上探测得到的卷云云高比 532 nm 稍高一些，其中 1 064 nm 探测得到的云顶高度最高，导致该情况出现的可能原因是，空气分子的后向散射与入射波长四次方成反比，当探测设备发射的激光波长越长时，探测到的空气分子的后向散射系数越小；而卷云粒子尺度较大，在 532 nm 和 1 064 nm 两个波长探测到的后向散射系数相差不会过大。因此，在卷云云顶高度反演分析过程中，1 064 nm 激光探测到的后向散射信号中，卷云粒子所占的比例较 532 nm 会偏大 (季承荔等，2014)。

2.2 卷云光学参数特征

图 4 为卷云过程期间统计得到的两个激光波长上卷云粒子雷达比频率分布。分析可知，两个波长探测到卷云粒子的激光雷达比变化范围较大，最小为 15.0 Sr，最大达 90.0 Sr，由此可见激光雷达比对于

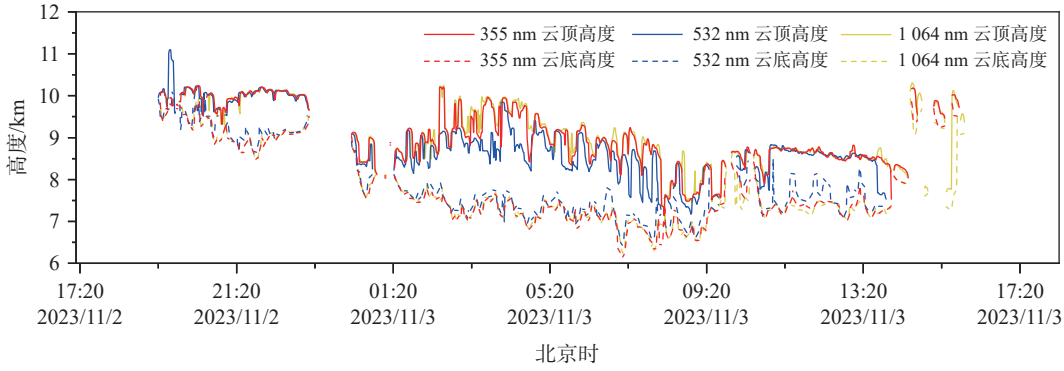


图 3 2023 年 11 月 2 日 17 时—3 日 17 时武汉拉曼-米雷达 355 nm、532 nm 和 1 064 nm 波长探测的卷云云底及云顶高度

Fig. 3 Cloud base and cloud top heights of cirrus detected by Raman-Mie lidar in Wuhan at wavelengths of 355 nm, 532 nm, and 1 064 nm from 17:00 BT on November 2 to 17:00 BT on November 3, 2023

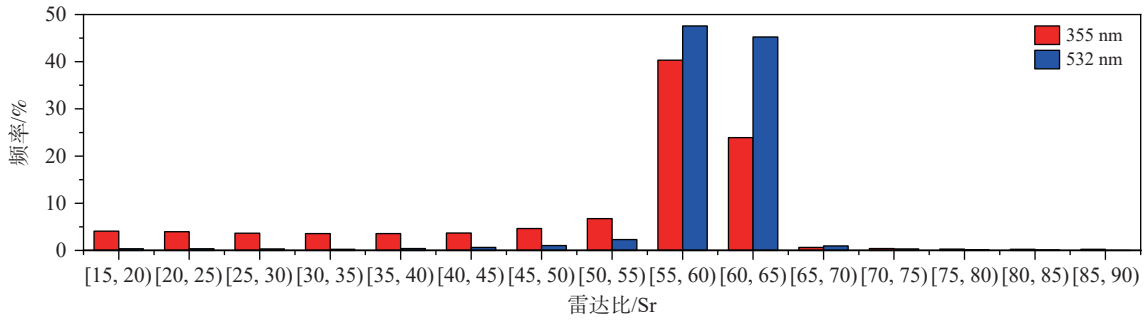


图 4 2023 年 11 月 2 日 17 时—3 日 17 时武汉拉曼-米雷达 355 nm、532 nm 波长探测的卷云粒子雷达比频率分布

Fig. 4 Lidar ratio frequency distribution of cirrus particles detected by Raman-Mie lidar in Wuhan at wavelengths of 355 nm and 532 nm from 17:00 BT on November 2 to 17:00 BT on November 3, 2023

粒子谱分布、形状等特征较为敏感。其中 355 nm 波长的平均雷达比为 40.6 Sr, 532 nm 波长的平均雷达比为 59.3 Sr。532 nm 雷达比均值较格尔木地区(潘昱冰等, 2015)的 23.8 Sr 偏高 35.5 Sr, 且这一结果较季承荔等 (2016)利用光学厚度反演得到的合肥地区雷达比结果也明显偏高, 在 355 nm 和 532 nm 两个波长上分别偏高 25.8 Sr、42.3 Sr。从频率分布来看, 355 nm 和 532 nm波长上雷达比基本维持在 55~60 Sr 以及 60~65 Sr 区间内, 532 nm 波长的雷达比在两个区间频率均超过 40%, 而 355 nm 波长的雷达比更多集中于 55~60 Sr。

结合后向散射系数和退偏振比信息可进一步了解粒子形态。图 5 分别给出拉曼-米雷达在 355 nm、532 nm 和 1 064 nm 波长下的后向散射系数以及 532 nm 波长下的退偏振比分布。分析可知, 三个波长下的后向散射系数垂直分布特征相似, 均表现为云团底部和顶部后向散射系数较小 (量级在 10^{-3}~10^{-2}), 而云团内部存在后向散射系数高值区 (量级在 10^{-2}~10^{-1}), 这表明云团底部和顶部的粒子形状不规则, 对激光向其他方向的散射作用使得后向散射系数偏小, 而云团内部规则球形的粒子产生的后向散射系数较大。通过比较不同波长之间的后向散射系数差异可以反映粒子尺寸大小。分析可知, 云底和云顶三个波长间后向散射系数差异小, 粒子尺寸大, 而云内 355 nm 和 532 nm 波长的后向散射系数明显高于 1 064 nm, 粒子尺寸小。从退偏振比来看, 退偏振比范围在 0.10~0.70, 其中 0.35~0.50 区间内分布最多, 云团底部和顶部退偏振比大多维持在 0.35 及以上, 较云团中部明显偏高。由此推测此次卷云过程中, 武汉地区卷云粒子伴随高度升高表现为非球形

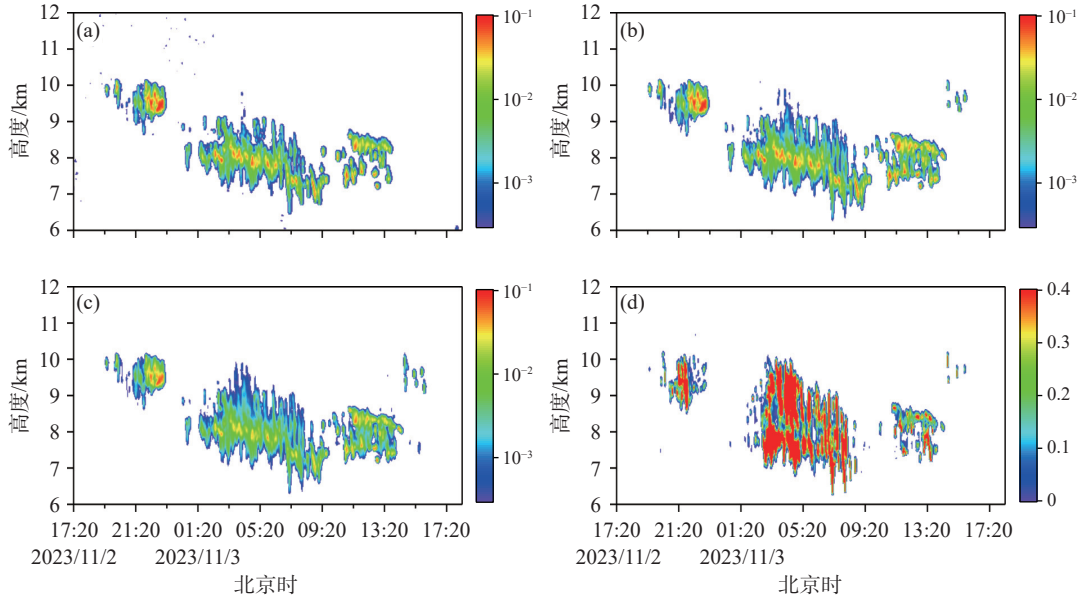


图 5 2023 年 11 月 2 日 17 时—3 日 17 时武汉拉曼-米雷达 355 nm (a)、532 nm (b)、1 064 nm (c) 波长的后向散射系数 (单位: $Sr^{-1}\cdot km^{-1}$) 和 532 nm 退偏振比 (d)

Fig. 5 Backscattering coefficient (unit: $Sr^{-1}\cdot km^{-1}$) detected by Raman-Mie lidar in Wuhan at wavelengths of (a) 355 nm, (b) 532 nm, (c) 1 064 nm, and (d) depolarization ratio at 532 nm from 17:00 BT on November 2 to 17:00 BT on November 3, 2023

粒子-类球形粒子-非球形粒子的分布特征，且自下而上呈冰晶-过冷水-冰晶分布，此结果与 Sassen 等 (1985) 通过地基激光雷达和飞机穿云试验得到的卷云探测结果相一致。

2.3 不同厚度的卷云廓线特征

卷云云层厚度 (云顶高度与云底高度的差值) 一般从几百米至几千米不等，依照卷云不同云层厚度，可以将卷云分为较薄云层 (厚度约为 500 m)、中等厚度云层 (厚度约为 1 000 m) 和较厚云层 (厚度大于 1 500 m) 三种不同类型 (陶宗明等, 2013a)。在本次探测过程中探测到较薄和较厚两种类型卷云，下面根据后向散射系数及后向散射系数颜色比探测结果对其进行分析。

图 6 为 2023 年 11 月 2 日 20 时 03 分拉曼-米雷达探测的较薄卷云的后向散射系数廓线和后向散射系数颜色比廓线，分析可知，卷云出现高度大约为 9.4～10.2 km。在不考虑卷云边缘等因素的影响下，只针对卷云云团内部粒子进行分析，计算得到三个波长的后向散射系数颜色比分别为 0.8 ($\beta_{1\,064\,nm}/\beta_{532\,nm}$)、0.7 ($\beta_{532\,nm}/\beta_{355\,nm}$)、0.6 ($\beta_{1\,064\,nm}/\beta_{355\,nm}$)。

图 7 给出 2023 年 11 月 3 日 02 时 41 分拉曼-米雷达探测的较厚卷云后向散射系数和后向散射系数颜色比的垂直廓线，分析可知，卷云出现高度约为 7.5~9.5 km，在该高度范围内，颜色比随高度增加出现了较为明显的震荡变化，在不考虑卷云边缘等因素的影响下，卷云云团内部粒子的颜色比均值分别为 0.8 ($\beta_{1\,064\,nm}/\beta_{532\,nm}$)、0.7 ($\beta_{532\,nm}/\beta_{355\,nm}$)、0.5 ($\beta_{1\,064\,nm}/\beta_{355\,nm}$)。

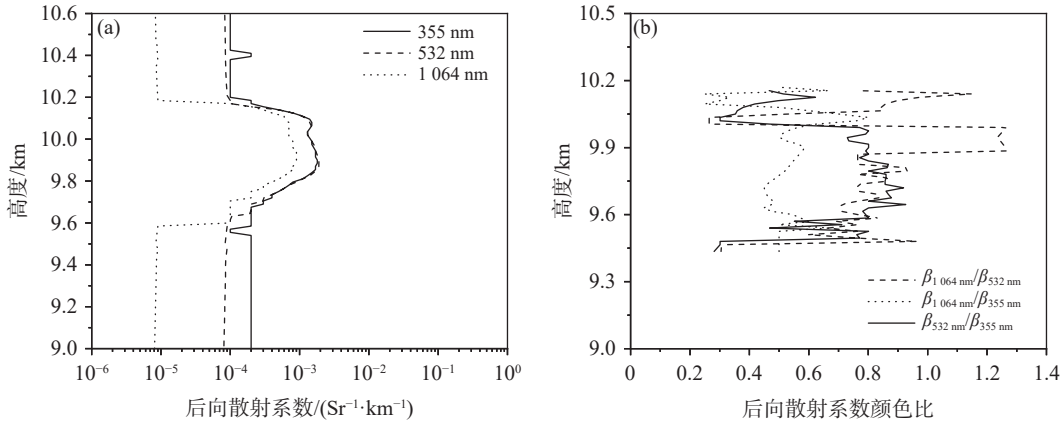


图 6 2023 年 11 月 2 日 20 时 03 分武汉拉曼-米雷达探测的薄卷云后向散射系数 (a) 和后向散射系数颜色比 (b) 廓线

Fig. 6 Profiles of (a) backscattering coefficient and (b) backscattering coefficient color ratio of thin cirrus detected by Raman-Mie lidar in Wuhan at 20:03 BT on November 2, 2023

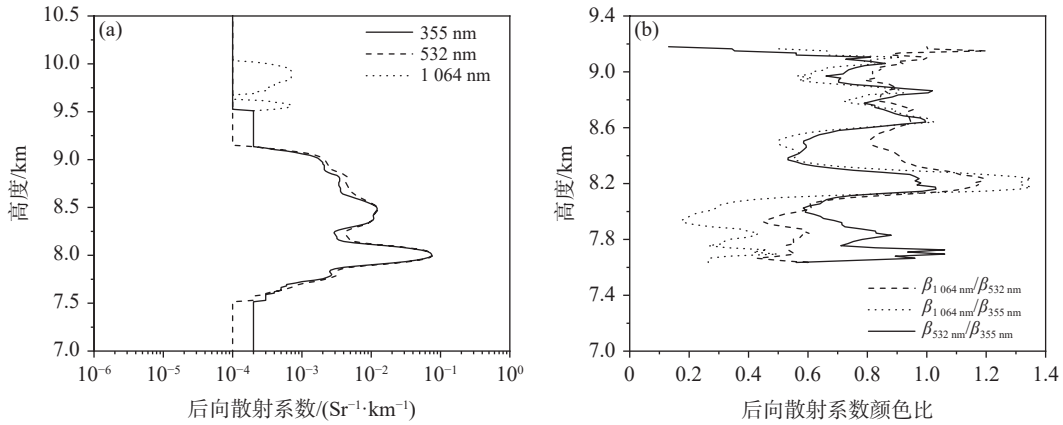


图 7 2023 年 11 月 3 日 02 时 41 分武汉拉曼-米雷达探测的厚卷云后向散射系数 (a) 和后向散射系数颜色比 (b) 的垂直廓线

Fig. 7 Vertical profile of (a) backscattering coefficient and (b) backscattering coefficient color ratio of thick cirrus detected by Raman-Mie lidar in Wuhan at 02:41 BT on November 3, 2023

3 结论与讨论

基于武汉地区 2023 年 10—12 月拉曼-米雷达的探测数据，以 11 月 2 日 17 时—3 日 17 时一次较为典型的卷云过程为例，利用激光雷达在 355 nm、532 nm 和 1 064 nm 波长上的探测结果，对武汉上空卷云粒子的光学参数特征进行分析，得出如下主要结论：

(1) 此次卷云过程中, 卷云云底高度位于距地面 6.0~9.0 km 范围内, 平均云底高度为 7.0 km。伴随卷云云团的发展, 云底高度随时间表现为先缓慢降低再逐渐升高的变化趋势。

(2) 卷云过程期间, 355 nm 波长的平均雷达比为 40.6 Sr, 532 nm 波长的平均雷达比为 59.3 Sr, 355 nm 波长的雷达比集中于 55~60 Sr, 532 nm 波长的雷达比主要分布在 55~65 Sr。

(3) 卷云粒子以冰晶为主, 垂直方向上退偏振比范围在 0.35~0.50, 云层中下部以非球形粒子为主, 中部粒子形态接近球形, 而云层中上部再度转为不规则形态。结合不同波长后向散射系数指示的粒子尺度变化, 此次卷云过程自下而上呈冰晶-过冷水-冰晶分布。

(4) 此次卷云过程中, 较薄和较厚卷云的后向散射系数颜色比多分布在 0.5~0.8 之间, 但受卷云云层厚度影响, 1 064 nm 和 355 nm 波长的颜色比存在部分差异。

武汉地区此次卷云过程的探测结果, 与合肥地区卷云平均高度 (9.2 km) (陶宗明等, 2013a)、格尔木地区卷云平均高度 (4.7 km) (潘昱冰等, 2015) 差异明显。卷云特征随季节、昼夜和天气条件等变化大 (季承荔等, 2016), 本文的探测分析结果表明, 武汉地区卷云发展过程较为复杂, 昼夜变化对卷云高度、相态等均有影响。本文仅是针对武汉地区一次卷云过程的初步分析, 若要获得规律性的卷云光学特征参数, 需要更多的探测试验数据进行论证, 这可为降低卷云在全球辐射强迫估算中的不确定性、改进气候模式云参数化方案等提供关键依据。

参考文献 (References):

狄慧鸽,侯晓龙,赵虎,等.2014.多波长激光雷达探测多种天气气溶胶光学特性与分析[J].物理学报,63(24):248−255. Di H G, Hou X L, Zhao H, et al. 2014. Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength mie lidar [J]. Acta Physica Sinica,63(24):248−255 (in Chinese). doi:10.7498/aps.63.244206

傅云飞.2018.云-降水遥感研究现状及夏季东亚云-降水研究思考[J].暴雨灾害,37(6):493−501. Fu Y F. 2018. Research actuality of remote sensing on cloud precipitation and reflections on summer East Asian cloud precipitation [J]. Torrential Rain and Disasters,37(6):493−501 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2018.06.001

黄忠伟,王雍恺,闭建荣,等.2022.气溶胶激光雷达的国内外研究进展与展望[J].遥感学报,26(5):834−851. Huang Z W, Wang Y K, Bi J R, et al. 2022. An overview of aerosol lidar: progress and prospect [J]. National Remote Sensing Bulletin,26(5):834−851 (in Chinese). doi:10.11834/jrs.20221388

季承荔,陶宗明,胡顺星,等.2014.三波长激光雷达探测合肥地区卷云特性[J].光学学报,34(4):9−14. Ji C L, Tao Z M, Hu S X, et al. 2014. Cirrus measurement using three-wavelength lidar in Hefei [J]. Acta Optica Sinica,34(4):9−14 (in Chinese). doi:10.3788/AOS201434.0401001

季承荔,陶宗明,胡顺星,等.2016.三波长激光雷达探测卷云有效激光雷达比[J].中国激光,43(8):268−274. Ji C L, Tao Z M, Hu S X, et al. 2016. Effective lidar ratio of cirrus cloud measured by three-wavelength lidar [J]. Chinese Journal of Lasers,43(8):268−274 (in Chinese). doi:10.3788/CJL201643.0810003

刘东,陶宗明,吴德成,等.2013.三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例[J].光学学报,33(2):230−235. Liu D, Tao Z M, Wu D C, et al. 2013. Development of three-wavelength-raman-polarization liadr system and case study [J]. Acta Optica Sinica,33(2):230−235 (in Chinese). doi:10.3788/AOS201333.0228001

柳英,阿吉古丽•沙依提,买买提艾力•买买提依明,等.2024.新疆昌吉绿洲地表辐射收支特征[J].沙漠与绿洲气象,18(1):66−73. Liu Y, Hajigul S, Ali M, et al. 2024. Characteristics of surface radiation budget in Changji oasis, Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(1):66−73 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.01.008

陆春松,徐晓齐.2021.云中夹卷混合过程的研究进展[J].暴雨灾害,40(3):271−279. Lu C S, Xu X Q. 2021. Advances in the studies of cloud entrainment and mixing process [J]. Torrential Rain and Disasters,40(3):271−279 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.03.005

潘昱冰,吕达仁,潘蔚琳,等.2015.地基双波长偏振激光雷达对格尔木地区卷云的探测个例研究[J].气候与环境研究,20(5):581−588. Pan Y B, Lv D R, Pan W L, et al. 2015. A case study of cirrus cloud over Geermu city using two-wavelength polarization lidar [J]. Climate and Environmental Research,20(5):581−588 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2015.15031

陶宗明,刘东,史博,等.2013a.基于三波长激光雷达对强卷云后向散射系数波长关系研究[J].北京理工大学学报,33(8):857−861. Tao Z M, Liu D, Shi B, et al. 2013a. Relationship between backscatter coefficient and wavelength lidar measurements [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,33(8):857−861 (in Chinese). doi:10.15918/j.tbit1001−0645.2013.08.014

陶宗明,刘东,魏合理,等.2013b.三波长激光雷达拟合卷云的粒子形状[J].光谱学与光谱分析,33(7):1739−1743. Tao Z M, Liu D, Wei H L, et al. 2013b. The estimation of cirrus cloud particulate shape using combined simulation and a three-wavelength lidar measurement [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,33(7):1739−1743 (in Chinese). doi:10.3964/j.issn.1000−0593(2013)07−1739−05

田磊,舒志亮,常倬林,等.2023.云中湍流特征及其在云降水中的作用研究进展[J].暴雨灾害,42(5):499−507. Tian L, Shu Z L, Chang Z L, et al. 2023. Advances in the studies of turbulence properties in the cloud and the role of turbulence in cloud and precipitation [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):499−507 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−198

汪天怡,李德俊,陈英英,等.2024.基于云高仪探测数据的湖北省襄阳市云宏观特征分析[J].暴雨灾害,43(2):234−242. Wang T Y, Li D J, Chen Y Y, et al. 2024. Analysis of cloud macro-physical characteristics in Xiangyang of Hubei Province based on ceilometer data [J]. Torrential Rain and Disasters,43(2):234−242 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−188

王秀萍,赛瀚,刘晓初,等.2023.大连地区一次副热带高压边缘暖锋暴雨机制分析[J].沙漠与绿洲气象,17(4):16−23. Wang X P, Sai H, Liu X C, et al. 2023. Mechanism analysis of a warm front rainstorm event at the edge of subtropical high in Dalian [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(4):16−23 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.04.003

薛新莲,戚福弟,范爱媛,等.2006.合肥地区卷云的激光雷达探测[J].量子电子学报,23(4):527−532. Xue X L, Qi F D, Fan A Y, et al. 2006. Lidar observations of cirrus clouds over Hefei [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics,23(4):527−532 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007−5461.2006.04.018

张华,谢冰,刘煜,等.2017.东亚地区云对地球辐射收支和降水变化的影响研究[J].中国基础科学,19(5):18−22. Zhang H, Xie B, Liu Y, et al. 2017. Study on the influence of clouds on the earth radiation budget and precipitation changes in east Asia region [J]. China Basic Science,19(5):18−22 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1009−2412.2017.05.004

张清泽,张辉,王平,等.2012.卷云有效激光雷达比反演方法研究[J].激光与光电子学进展,49(6):62−67. Zhang Q Z, Zhang H, Wang P, et al. 2012. Retrieval methods of cirrus cloud effective lidar ratio [J]. Laser & Optoelectronics Progress,49(6):62−67 (in Chinese). doi:10.3788/LOP49.060102

张正国, 陈燕丽, 简悦, 等.2024.桂西岩溶区云水分布和移动特征[J].高原山地气象研究,44(3):129−136. Zhang Z G, Chen Y L, Jian Y, et al. 2024. Distribution and movement characteristics of cloud water in Karst Areas in Western Guangxi [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(3):129−136. (in Chinese) doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.03.015

赵虎,华灯鑫,狄慧鸽,等.2015.全天时多波长激光雷达系统研制与信噪比分析[J].中国激光,42(1):276−283. Zhao H, Hua D X, Di H G, et al. 2015. Development of all time multi-wavelength lidar system and analysis of its signal to noise ratio [J]. Chinese Journal of Lasers, 42(1):276−283. doi:10.3788/CJL201542.0113001

Ansmann A, Wandinger U, Riebesell M, et al. 1992. Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar [J]. Applied Optics,31(33):7113−7131. doi:10.1364/AO.31.007113

Beyerle G, Gross M R, Haner D A, et al. 2001. A lidar and backscatter sonde measurement campaign at table mountain during February-March 1997: observations of cirrus clouds [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,58(10):1275−1287. doi:10.1175/1520−0469(2001)058<1275:ALABSM>2.0.CO;2

Chen W, Chiang C, Nee J B. 2002. Lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds [J]. Applied Optics,41(30):6470−6476. doi:10.1364/AO.41.006470

Ge J, Zheng C, Xie H, et al. 2018. Midlatitude cirrus clouds at the SACOL site: macrophysical properties and large-scale atmospheric states [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,123(4):2256−2271. doi:10.1002/2017JD027724

Hong G, Yang P, Gao B C, et al. 2007. High cloud properties from three years of MODIS Terra and Aqua Collection-4 data over the tropics [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,46(11):1840−1856. doi:10.1175/2007JAMC1583.1

Immler F, Krüger K, Tegtmeier S, et al. 2007. Cirrus clouds, humidity, and dehydration in the tropical tropopause layer observed at Paramaribo, Suriname (5.8°N, 55.2°W) [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,112(D03209):1−14. doi:10.1029/2006JD007440

Mao F, Gong W, Li J, et al. 2010. Cloud detection and parameter retrieval based on improved differential zero-crossing method for mie lidar [J]. Acta Optica Sinica,30(11):3097−3102. doi:10.3788/aos20103011.3097

Mitchell D L, Garnier A, Pelon J, et al. 2018. CALIPSO (IIR-CALIOP) retrievals of cirrus cloud ice-particle concentrations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,18(23):17325−17354. doi:10.5194/acp−18−17325−2018

Sakai T, Nagai T, Nakazato M, et al. 2003. Ice clouds and Asian dust studied with lidar measurements of particle extinction-to-backscatter ratio, particle depolarization, and water-vapor mixing ratio over Tsukuba [J]. Applied Optics,42(36):7103−7116. doi:10.1364/ao.42.007103

Sassen K, Liou K N, Kinne S, et al. 1985. Highly supercooled cirrus cloud water: confirmation and climatic implications [J]. Science,227(4685):411−413. doi:10.1126/science.227.4685.411

Wang M, Su J, Han X, et al. 2024. Changes in daytime cirrus properties from the ISCCP-H data set and their impacts on the radiation energy budget [J]. Earth and Space Science,11(9):1−21. doi:10.1029/2023EA003352

Wang W, Yi F, Liu F, et al. 2020. Characteristics and seasonal variations of cirrus clouds from polarization lidar observations at a 30°N plain site [J]. Remote Sensing,12(23):1−23. doi:10.3390/rs12233998

Vaughan M A, Liu Z, McGill M J, et al. 2010. On the spectral dependence of backscatter from cirrus clouds: assessing CALIOP's 1064 nm calibration assumptions using cloud physics lidar measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,115(D14206):1−17. doi:10.1029/2009JD013086

Zhang H, Yin Q, Nakajima T, et al. 2013. Influence of changes in solar radiation on changes of surface temperature in China [J]. Acta Meteorologica Sinica,27(1):87−97. doi:10.1007/s13351−013−0109−8

Zhang H, Zhang Y, He H, et al. 2017. Comparison of raindrop size distributions in a midlatitude continental squall line during different stages as measured by PARSIVEL over east China [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,56(7):2097−2111. doi:10.1175/JAMC−D−16−0336.1

(责任编辑 唐永兰)