

三频雷达遥感云参数能力的进一步模拟与分析

霍娟 乔聪聪 王一楠 韩琰琰 段民征

中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室

摘要 本文在研究团队前期工作基础上,针对非降水云中多种形态的冰晶粒子开展了三种典型短波雷达(X波段-9.5GHz-3cm、Ka波段-35GHz-8mm、W波段-94GHz-3mm)探测的模拟,对比分析了三种波长情况下粒子物理特征改变所引起的雷达回波变化情况,分析了联合利用三波长雷达探测数据识别冰晶形态的可能性。研究表明,W波段尽管波长短,灵敏度高,但是冰晶后向散射特征相比X波段和Ka波段要复杂很多,入射角度、粒子形态、粒子大小等的不同均会引起后向散射剧烈而复杂的改变,对基于统计或经验拟合法来提取云粒子微物理特征的反演方法带来挑战。已有分析结果亦显示,利用多波长雷达观测量之间的差异特征,有助于提供云内粒子微物理信息。例如,冰云中当W波段与Ka波段或W波段与X波段之间的反射率因子差值明显较大时,例如低于-3dBZ时,则很可能存在“长”粒子,这些工作为基于多波长雷达回波反演云微物理参数算法的建立和精度提高提供了参考和经验。

关键词 雷达 微物理 模拟 反演 冰晶

文章编号

中图分类号 P458

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2407.24038

Further Simulation and Analysis of the Triple-frequency Radar in Detecting Cloud

HUO Juan QIAO Congcong Wang Yinan HAN Congzheng DUAN Minzheng

Key Laboratory for Atmosphere and Global Environment Observation, Chinese Academy of Sciences

Abstract Based on our prior research, this paper carries out the simulation of three typical short-wavelength radar detections (X-band-9.5GHz-3cm, Ka-band-35GHz-8mm, and W-band-94GHz-3mm) for non-precipitation cloud particles, particularly ice crystals. It further compares and analyzes the radar reflectivities stemming from variations in the particles' physical attributes. Additionally, the study explores the feasibility of employing these three radar wavelengths to discern the morphology of ice crystals. The results show that, despite the W-band's short wavelength and heightened sensitivity, the backscattering characteristics of ice crystals exhibit a considerably more intricate pattern than those observed in the X-band and Ka-band. Variations in incident angle, particle morphology, and particle size elicit dramatic and complex alterations in backscattering, posing a formidable challenge to traditional inversion methods that rely on statistical or empirical fitting approaches to extract cloud particle microphysical properties. It has also been shown that utilizing the characteristics of the differences between multi-wavelength radar observations can help to provide microphysical information about particles in clouds. For example, in the ice cloud, a pronounced disparity in reflectivity factor between the W-band and either the Ka-band or X-band, particularly when it dips below -3 dBZ, suggests the likelihood of prolate particle presence. This offers invaluable insights and

收稿日期 2024-4-11; 网络预出版日期

作者简介 霍娟, 女, 博士, 研究员, 主要从事云遥感与辐射研究。E-mail: huojuan@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金资助项目 42275081

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 42275081)

practical experience for refining and enhancing the accuracy of algorithms designed to invert cloud microphysical features based on triple-frequency radar data.

Keywords radar, microphysics, simulation, inversion, ice crystals

1 引言

云对雷达电磁波的散射,是雷达探测云的基础。当雷达波束投射到云粒子上时,产生散射现象,其中向后方散射的一部分散射波重新返回雷达天线处,即所谓的雷达回波(雷达后向散射)。雷达回波强度除了与雷达各软硬件系统特性、雷达和云之间的距离、期间的大气状况有关外,还与云粒子的性质有关(张培昌 等,2000)。气象上常把云中的液态小云滴近似地认为是圆球形(Zhu et al., 2019)。雷达波长确定后,球形粒子的散射情况主要取决于粒子直径 D 和入射波长 λ 之比。对于 $D \ll \lambda$ 的小球形粒子的散射,称为瑞利散射; $D \approx \lambda$ 的大球形的散射,称为米散射(Liou, 2004)。风洞实验及数学计算表明,降水粒子在下降过程受到表面张力、液体静压力、空气动力和重力等力的共同作用,下落末速度达到平衡后粒子形状将维持稳定,在粒子超过一定尺度时这种稳定形状将表现出明显的非球形特征,随着降水粒子尺度的增加,这种非球状特征表现得更加显著(孙海冰, 1998; Miles et al., 2000)。云中的固态粒子,主要表现为冰晶及由冰晶生长得到的固态水凝物如雪晶、雪花、雪片及雹等。由于温度、水汽及压力的不同,冰晶的形状可呈现为柱状、枝状、片状等多种形状,冰晶生长物的形状则更加复杂(Baran, 2012; Kuhn and Heymsfield, 2016; 黄敏松等, 2020)。在研究云粒子的雷达后向散射特征时必须考虑非球形特征的影响。对非球形粒子的散射特性,米散射理论或瑞利散射理论不再适用,适用于液态云滴的微物理反演算法亦不再对降水粒子及冰晶粒子适用。

近些年,国内外特别是我国地基多波长(频率)雷达探测技术发展迅速,例如中国科学院大气物理研究所联合安徽四创公司先后成功研制了双波长、三波长雷达系统,分别在北京、西藏、淮南等地实现外场同时观测(刘黎平等, 2014; 陈羿辰等, 2018; Kollias et al., 2020; Mróz et al., 2020; 毕永恒等, 2022; 李浩然等, 2023)。面对仪器技术的快速发展,为了充分发挥多波长雷达对云与降水的探测能力并为国家天气气候预测工作服务,开展基于多波长雷达数据反演云微物理特性的理论及应用研究迫在眉睫。研究团队先前以球形液态云粒子作为研究对象,对当前主流的三种典型波长 X 波段(9.5 GHz、3 cm)、Ka 波段(35 GHz、8 mm)和 W 波段(94 GHz、3 mm)短波雷达的液态云滴的遥感探测能力开展了模拟分析,一方面证实了基于 T 矩阵算法建立的雷达回波参数模拟方法具有较好的精度,同时利用三波长雷达探测特点对液态云滴的微物理参数反演建立了一些理论和反演依据(霍娟等, 2024)。

云与降水的散射特征与电磁波频率、粒子的形状、尺度、粒子取向、电磁波入射及散射方向、以及它们的电学特性等等都有关系。本文在研究团队前期已有工作基础上,拟针对非降水云粒子,特别是具有多种形态的冰晶粒子开展三种典型的短波雷达(X 波段-9.5GHz-3cm、Ka 波段-35GHz-8mm、W 波段-94GHz-3mm)探测的模拟与分析。本文先从单个粒子的后向

散射着手，通过模拟计算来对比分析相态、温度、入射角度、形态等不同情况下的后向散射特征，进一步认识不同波长情况下，粒子的各种不同物理特征的变化对后向散射（即雷达回波）改变的贡献或权重情况等，所做工作是为基于多波长雷达回波反演云微物理参数算法的建立和精度提高提供参考和经验。

2 基于 T 矩阵法的散射特征量计算基础知识

云或大气的散射辐射传输中，入射光（波）和散射光（波）被用 Stokes 参量如式（1）表示(van de Hulst, 1957):

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_V + I_H \\ I_V - I_H \\ I_{+45} - I_{-45} \\ I_R - I_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

针对复杂形态的粒子，需要建立非球形粒子的求解模型。按照计算原理，常见的求解模型大致分为三种：一种是基于体积积分方程的散射模型，第二种是基于时域微元法的散射模型，第三种是基于辐射场展开方式的散射模型。三种模型所适用的尺度参数范围、粒子的形态类型以及模型算法的复杂度各有不同(胡帅, 2018)。就雷达探测而言，基于场展开方式的散射计算模型相比其它方式其计算相对便捷、精度有保证且适用类型丰富(Oue et al., 2020)。基于场展开方式散射模型的求解特点是，其先使用矢量波函数对电磁波入射场、内场及散射场进行展开，然后在特定的边界条件下通过使用微分方程或者积分方程把入射场与散射场展开系数之间建立相应关系，通过求解该微分方程或积分方程从而实现对散射过程的求解。相比其他方法，基于拓展边界法的 T 矩阵方法针对云粒子的雷达回波散射场计算优势明显，T 矩阵本身是独立于粒子取向、入射波方向及偏振状态的量，同时还包含了计算粒子的所有散射特征量，在对旋转状粒子计算时，T 矩阵方法可以得到极大简化，极大地提高了模型计算效率(Mishchenko et al., 1996; Mishchenko et al., 2002)。本文所用 T-矩阵核心源代码来自 Mishchenko，我们根据研究需求在其基础上做了简单修改。

图 1 电磁波入射角度与散射角关系示意图，图中 θ 为入射天顶角， φ 为入射光方位角， Θ 为散射角。

Illustration of the relationship between the phase and scattering matrices, θ is the zenith angle of incident beam, φ is the azimuth angle of incident beam, and Θ is the scattering angle.

在散射模型中，散射相矩阵（Scattering Phase Matrix）是一个重要量，通过用矩阵的形式描述和计算散射过程。散射相矩阵由 16 个非零元素组成，这些元素反映了散射波（光）在不同方向上的分布以及偏振状态的变化。散射相矩阵 $\mathbf{P}$ 的定义如下式（2）所示：

$$\begin{bmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{bmatrix} = \frac{c_{sca}}{4\pi r^2} \mathbf{P}(\vartheta, \varphi) \begin{bmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{bmatrix} = \frac{c_{sca}}{4\pi r^2} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式（2）中脚标“s”表示散射，“i”表示入射，“r”表示距离， C_{sca} 表示散射截面。这个 4×4 的散射相矩阵可全面描述散射粒子的尺度、取向、散射角等对散射波（光）强度及偏振状态的作用和影响。利用散射相矩阵中的元素可以计算得到粒子的散射物理特征量（Mishchenko, et al., 2000）。式（2）中各元素与入射角 θ 相关（电磁波散射与入射角度的关系见图 1），由于一般假设云粒子取向随机，因而认为与方位角无关。当随机取向的粒子有一个旋转对称轴，那么在式（2）中有 $P_{21} = P_{12}$ 和 $P_{43} = -P_{34}$ 。本文研究对象是不同频率电磁波的云粒子散射，所以与毫米波雷达探测参数（例如反射率因子、退偏振比）相关的物理特征量主要包括相矩阵中的 P_{11} 和 P_{22} 。 P_{11} 值表示散射强度随散射角的空间分布，可帮助我们量化并比较不同散射过程或不同散射粒子对光（电磁波）的散射效果。 P_{22} 值则是表示电磁波正交极化散射相关量。由于本文研究的对象是雷达回波，即粒子对雷达波的后向散射（散射角 180° ），下文为方便起见，将符号 P_{11} 专门用于表示粒子对雷达波的后向散射。

另外，非球形粒子散射过程中，散射电磁波中将出现与入射电磁波电矢量方向正交的分量，即会发生所谓的退偏振现象。本文用 P_x （定义见式 3）来定量描述这一退偏振现象，常称之为线性退偏比（linear depolarization ratio, LDR）(Mishchenko et al., 2002)。

$$P_x = (P_{11} - P_{22}) / (P_{11} + P_{22}) \quad (3)$$

3 基于 T 矩阵法的 P_{11} 和 P_x 计算与分析

3.1 P_{11} 与粒子相态

云中粒子的相态通常可以分为固态、液态和混合态，首先计算并对比分析固态粒子和液态粒子在不同波长的后向散射特征（见图 2）。结合观测数据，计算时将粒子尺度（直径）范围设定为 $1-1500\mu m$ ，使其包括绝大多数情况下的云粒子尺度。

图 2 两种云粒子（液态和固态） P_{11} 值在三种波长（X、Ka 和 W 波段）条件下随粒子半径的变化情况。图中实线-液态球粒子，虚线-固态球粒子；红色-X 波段，绿色-Ka 波段，蓝色-W 波段。

Fig. 2 Variation of P_{11} of two type particles (liquid and solid) with dimension at three wavelengths (X, Ka and W bands). Solid line - liquid spherical particles, dashed line - solid spherical particles; red - X band, green - Ka band, blue - W band.

为了便于清楚显示和对比计算结果，选择相同温度 285K 条件的液态粒子、温度 257K 的固态粒子以及入射角 θ 均为 30° 时的情况作为代表进行展示。此时 X/Ka/W 条件下液水的复折射指数分别为: $7.893532+2.335222i$, $4.720452+2.705535i$, $3.121392+1.701334i$ ；冰粒子的复折射指数分别为 $1.781527+0.000181i$, $1.781528+0.000661i$, $1.781528+0.001782i$ 。图 2 所示计算结果，除波长和粒子相态不同外，其余条件如温度、入射角度等都相同，而温度或入射角度等对后向散射的影响将在下文中逐一分析。如图 1 所示，同一波长条件下，粒子尺度、温度及角度等条件相同时，液态粒子的后向散射高于冰粒子的后向散射，多数情况下达到约 10 倍左右。从不同波长的后向散射对比来看，波长越短散射能力越强。瑞利散射的计算结果其实亦已明确此时粒子散射能力与波长的 4 次方成反比这一特征。图 2 中可以看到

在 X 和 Ka 波段时，其散射特征与瑞利散射结果相似，但是在 W 波段（图 2 蓝色线）， P_{11} 值随粒子半径的变化则有所不同，例如当粒子半径大于 $400\mu\text{m}$ 之后，液态粒子的 P_{11} 值与冰粒子的 P_{11} 值之间的差距则变得越来越小。以上结果说明液态和固态粒子共存的云中，相同谱分布条件下液态粒子的后向散射贡献远大于冰粒子，可能会出现由于冰晶粒子的散射贡献相对较小在雷达回波中占比不高而被“忽视”的情况。因此对于混合云而言，雷达回波强度亦将与冰相和液态粒子的混合比密切相关，未知的混合比将增加基于雷达回波的微物理参数的反演和提取难度。对于已有的云微物理参数反演方法来说，无论是经验拟合或者是最优估计等，是否具有识别并区分云相态的能力对反演精度会有较大影响。

3.2 P_{11} 与温度

通常，云的温度范围大致在 10°C 到 -50°C 之间，卫星探测结果显示也存在 -60°C 或更低温度的冰云(Heymsfield et al., 2017)。由于冰粒子与液态云滴的 P_{11} 值不同，需分别对冰晶和云滴计算不同温度下的后向散射情况。图 3 中对于冰晶粒子的计算结果表明，三种波长条件下， P_{11} 值随温度的变化并不明显，说明对温度不太敏感，当对反演精度要求不过高时可在算法中忽略温度条件。

图 3. 不同温度条件下，扁椭圆形（横纵轴比=2）冰晶粒子的 P_{11} 随半径的变化情况。(a): X 波段; (b): Ka 波段; (c): W 波段。颜色代表不同的温度（单位为 K）。

Fig.3. Variation of P_{11} with radius for oblate (ratio of the horizontal to rotational axes is 2) ice crystal particles at different temperatures. (a): X-band; (b): Ka-band; (c): W-band. The colors represent different temperatures (in K).

与冰晶粒子相比，液态云滴的后向散射与温度的关系则略有不同（见图 4），这种不同主要体现在不同的雷达波长上。X 波段条件下，不同温度的后向散射值几乎重叠一起，说明温度的影响不大，几乎可以忽略；在 Ka 波段，后向散射随温度的变化逐步有所不同，温度越高值越大，而这种差异在 W 波段变得更加明显，且随粒子尺度的增加这种变化趋势也有所不同（见图 4c）。

图 4. 其余参数相同，不同温度条件下，云滴粒子的 P_{11} 随半径的变化情况。(a) X 波段; (b) Ka 波段; (c) W 波段。颜色代表不同的温度（单位为 K）。

Fig. 4. Variation of P_{11} with radius for cloud droplets under different temperature conditions. (a) : X-band, (b) : Ka-band, (c): W-band. The colors represent different temperatures (in K).

为了更清楚认识这一特点，图 5 中给出了三种波长情况下，温度 301K 与温度 237K 时 P_{11} 之间的比值分布情况，不难看出，X 波段时二者比值接近 1，且不随粒子大小变化；Ka 波段约为 1.3，当粒子逐步增大时该值略有增加；W 波段的比值变化最大，且随粒子大小的变化该比值有不同的起伏，在 $370\mu\text{m}$ 左右时该比值达到高值约 5。以上分析说明，W 波段条件下，液态云滴的反演必需考虑温度的影响；而在 X 波段条件下，则无需考虑温度的影响；Ka 波段条件下，比值增加但由于随粒子尺度的变化情况相对简单，对温度的影响可做适当简化处理。

图 5. 三种波长情况下，两种温度（301K/237K）之间的 P_{11} 比值随粒径大小的变化。

Fig. 5. Variation of P_{11} ratio with particle size between two temperatures (301K/237K) for three wavelengths.

3.3 P_{11} 与入射角

图 6. 三种云粒子形态、三种波长下的 P_{11} 随入射角 θ 及粒子尺度的变化。图中粒子都是轴旋转对称，指向为 30° ，入射角 θ 范围 $0-90^\circ$ 。上行为球形云滴，中间行为扁椭球冰晶（纵横比为 2），下行为 ChebyshevT4(0.15)冰晶粒子；左列为 X 波段，中间列为 Ka 波段，右列 W 波段。

Fig. 6. Variation of P_{11} with incident angle and particle size for three type particles and three wavelengths. The particles are all axially rotationally symmetric, with the orientation angle at 30° and the incident angle θ ranging from $0-90^\circ$. Spherical cloud droplets in the upper row, oblate ice crystals (ratio of the horizontal to rotational axes is 2) in the middle row, and ChebyshevT4(0.15) ice crystal particles in the lower row; X-band shown in the left column, Ka-band in the middle column, and W-band in the right column.

一般将液态云滴近似为球形。球形粒子对不同入射角度电磁波的后向散射分布情况见图 6 (a,b,c)，计算时天顶方向入射角 θ 为 0° ，与其平行的旋转轴方向为 0° （参见图 1）。由图 6 可见，球形粒子的后向散射与电磁波的入射角度无关，即云中液态云滴的后向散射可不考虑电磁波的入射角度。图 5 中还同时给出了两种冰相粒子随不同入射角度的后向散射分布情况。对于扁椭球粒子（纵横轴比为 2，见图 6d, e, f），不同波长条件下的后向散射分布情况各不相同：在 X 和 Ka 波段条件下， P_{11} 高值出现在 40° 周围附近，但是在 $0-90^\circ$ 范围内的变化幅度相对较小，这种幅度小于粒子尺度变化所产生的变化幅度；相比较而言，W 波段条件下， P_{11} 随角度的变化则非常明显，变化的幅度显著高于粒子尺度变化所产生的变化幅度。对于 ChebyshevT4(0.15)冰晶粒子（见图 6g, h, i），同样在 W 波段 P_{11} 值变化相比另两个波段最为明显和复杂，其随角度的变化程度以及随粒子大小的变化复杂情况相对介于球形粒子和扁椭球粒子之间，这可能与该粒子形态相对比较接近球形粒子有关。

以上对比分析不难看到，对于非球形粒子，X 和 Ka 波段时入射角度的改变引起的后向散射改变的幅度相对由于粒径大小改变而产生的变化幅度要小，X 波段的变化在三个波长里面是最起伏最小的。而 W 波段则有所不同，其震荡幅度非常显著，且入射角度与 P_{11} 值的变化关系还与粒子的形状和大小密切相关：（1）球状时，不随入射角度改变，此时只需考虑粒子大小；（2）非球状时，粒子纵横轴比越大，离球体形状越远，入射角度的改变所产生的影响越大，甚至在一些条件下的影响程度高于粒径大小所产生的变化，此时既要考虑粒径大小又要考虑入射角度的影响。

3.4 P_{11} 与粒子形状

图 7. 温度为 257.0K，粒子指向角度 30° ，入射角 46° 时，三种波长(a - X 波段，b-Ka 波段，c-W 波段)条件下，26 种冰晶形状（表 1）计算的 P_{11} 与球状冰晶 P_{11} 的比值情况。 $R_{11} = P_{11_形状 i} / P_{11_球状}$

Fig. 7. Ratio of P_{11} for 26 ice crystal shapes (Table 1) to sphere ice crystal P_{11} at three wavelengths (a - X-band, b - Ka-band, and c - W-band) at a temperature of 257.0 K, orientation angle of 30° , and incident angle of 46° . $R_{11} = P_{11_shape i} / P_{11_sphere}$

将温度、粒子指向和入射角度固定，我们还计算并分析了 26 种不同冰晶粒子形状（见表 1）条件下的 P_{11} 值分布情况。本文中粒子指向角度为粒子对称轴角度，其定义与电磁波入射角度相同（参见图 1）。以上的分析结果不难看出球形粒子的计算和处理相对较为简单，本节中我们将不同形状的计算结果与球状粒子的计算结果进行比较，便于了解非球形粒子相对球形粒子的变化情况，为可能的反演算法建立提供经验或“简化”依据。图 7 给出的是 26 种形状的冰晶与球状冰晶(即表 1 中的“11.”，横纵轴比值为 1)之间的 P_{11} 值比值（下文用 R_{11} 表示， $R_{11}=P_{11_形状i}/P_{11_球状}$ ）。在 X 波段（图 7a），这些形状的粒子其比值范围集中于 0.5~2 之间，冰晶形状越接近球形时， R_{11} 值越接近 1；反之离球形越远， R_{11} 值也逐步远离数值 1，或大于 1 或小于 1；Chebyshev 体形状的粒子它们的比值聚集在 1 周围；横纵轴比值小于 1 时（长椭球或长圆柱）所计算 R_{11} 的值一般小于 1，扁椭球（圆柱）的 R_{11} 则大于 1，说明相比球形粒子，在此入射角度情况下，扁形态的粒子后向散射会增加，而长形态的粒子后向散射会减小。在 Ka 波段（图 7b）， R_{11} 值的分布范围相对 X 波段情况下有所扩大，主要集中于 0.8~8 范围内。总体来说，在 X 和 Ka 波段下， R_{11} 值随粒子尺寸的变化有缓慢上升或缓慢单调下降的趋势，这种变化趋势相对较为平缓。相比 X 和 Ka 波段，在 W 波段，不同形状下的冰晶粒子 R_{11} 值随尺度的变化情况变得复杂，不再是单调递增或递减的曲线，而是带有拐点的曲线，甚至在长圆柱和长椭球粒子时出现了两处拐点，并且分布于 $10^{-3} \sim 10^1$ 范围之内，变化幅度较大。由此可见，在 W 波段，由于波长较短，粒子形状的影响变得非常显著，且这种变化还与粒子的尺度相关。当然以上结果都是基于粒子指向固定和入射角度固定情况下的一类情况，实际自然条件下的 R_{11} 值还会随粒子指向和入射角度的变化而变化，进一步增加了复杂性。

表 1 26 种形态冰晶粒子参数

Table 1 Parameters of 26 types of ice crystal particles

横纵轴比 形状编号	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	3	4	5
椭球状 	I.2	I.4	I.6	I.8	I1.	I2.	I3.	I4.	I5.
圆柱状 	Y.2	Y.4	Y.6	Y.8	Y1.	Y2.	Y3.	Y4.	Y5.
Chebyshev 	 2 (0.2)	 2 (-0.2)	 3 (0.15)	 3 (-0.15)	 4 (0.15)	 4 (-0.15)	 8 (-0.1)	 8 (0.1)	
	V2.1	V2.2	V3.1	V3.2	V4.1	V4.2	V8.1	V8.2	

综合以上计算结果不难看到，雷达波长变短，雷达回波随温度、角度、粒子形态的分布情况变得越来越复杂：在 X 波段时温度、入射角度、粒子形状对 P_{11} 值的作用程度相对其他两个较短的波长要简单很多，总体呈现与瑞利散射相近的特征，满足雷达气象方程雷达反射率因子的定义，在开展微物理参数反演算法时可采用相对简单的拟合关系，应该也能具有一定的准确度。但是，在 W 波段下， P_{11} 值对粒子形态、入射角度以及粒子大小的变化都变得比较敏感，且变化特征亦比较复杂，复杂的变化特点较难以用简单的数学方法表述，此时若还是采用单一的拟合关系来反演云内微物理参数，势必会造成较大的误差。

从分析结果亦可看到，无论是那种雷达波段，液态粒子和冰相粒子之间的 P_{11} 值差距较为明显，从而粒子相态是影响雷达回波值的首当其冲的重要因子。因此，在开展反演算法研究工作时，可能的情况下应先采取手段对粒子相态进行识别。一般来说云中的液态云滴多可近似为球形，确定为液态云滴的微物理反演工作则会变得较为简单。对于冰晶粒子，由于形状多种多样，尤其是对于具有更高观测高灵敏度的 W 波段而言，为了充分发挥 W 波段雷达的探测优势和能力，则需要在形态、角度等方面开展更多和更细致的模拟和分析工作，便于提高其对冰晶粒子的微物理参数反演能力。就粒子相态识别而言，温度常常被用来当做一种手段，此外也有研究利用雷达的极化特征来开展工作(Aydin et al., 2015)，下节中将通过数值模拟的手段分析和讨论基于退偏振特征 (P_x) 以及三波长雷达的组合特征信息开展相态识别的可能性或能力，为云相态的识别提供可能的经验或依据。

3.5 粒子形状与 P_x

与上述分析 P_{11} 值的方法类似，我们同样计算了 P_x 值，对于极化雷达来说，该参数是设备观测之一。图 8 中 a,b,c 三图给出了温度为 257.0K，粒子指向角度 30° ，入射角 46° 时三种波长情况下 26 种冰晶粒子的 P_x 值随粒径大小的变化情况。从 P_x 值本身的定义可知，球状 (11.) 时 P_x 值为 0。在 X 波段 (图 8a)，不同形态的粒子其 P_x 值有不同程度的增加，但随形态变化的幅度很小，例如最大的 P_x 值约为 0.009，为横纵轴比值为 0.2 的长圆柱状粒子。在 Ka 波段， P_x 值随粒子形态不同呈现的差异程度相比 X 波段有所增加，但是增加幅度较大的主要是横纵比值为 0.2 的长椭球和长圆柱两种，其他形状的粒子，例如 Chebyshev 形态的粒子则同样也主要集中于 0-0.01 之间。在 W 波段， P_x 值的变化情况变得复杂起来， P_x 最大值达到 0.7 左右，是纵横比为 0.2 的长圆柱体； P_x 值随粒子尺度的变化震荡幅度也比较大，与 X 和 Ka 波段的单调变化不同，W 波段的 P_x 值随粒子大小有增有减，不同形态的粒子会出现不同的拐点；长椭球体和长圆柱体的 P_x 值变化相比扁形态的粒子变化幅度大。但是从 P_x 值的分布情况来看，该值难以将椭球状或是圆柱状进行区分开来。在 W 波段，Chebyshev 形态的粒子其 P_x 值依然相对接近值 0，可能是形态总体来说较为接近球体的缘故，说明粒子总体形态上越接近球形，其 P_x 值越接近 0 的可能性越大，即便粒子上出现相对较平的凹角或凸出似乎不会造成 P_x 值有大的改变。总体而言，基于 P_x 值可以较明显区分出球形粒子和非球形粒子，从而当一般认为云中云滴多为球形时，该值将是一个区分液态和固态粒子的非常有效的手段。

图 8. 温度为 257.0K，粒子指向角度 30° ，入射角 60° 时，三种波长(a-X 波段，b-Ka 波段，c-W 波段)条件下，26 种冰晶形状 (表 1) 的粒子其 P_x 值随粒子尺度的变化情况。

Fig. 8. Variation of P_x values with particle size for particles of 26 ice crystal shapes (Table 1) at three wavelengths (a-X-band, b-Ka-band, and c-W-band) at a temperature of 257.0 K, orientation angle of 30° , and incident angle of 60° .

4. 基于雷达方程的雷达观测参数模拟与分析

本文第三节利用 T 矩阵方法，将与雷达探测相关的两个重要参数 P_{11} 及 P_x ，在温度、角度、形态等多个方面开展了较为详细的敏感性分析，本节中将结合雷达气象方程，从雷达实测参量角度出发，模拟和分析不同波长雷达观测数据随粒子形态、观测角度的关系变化情况，便于更直观地展示云粒子的微物理量与雷达实测参量之间的关系，为深入认识和使用三波长雷达开展科学应用提供辅助参考和依据。在下面的计算中，我们假设冰晶粒子的谱分布形式为 Gamma 分布：

$$n(D) = N_0 D^\mu e^{-\lambda D} \quad (4)$$

上式中 D 为粒子直径，单位为 μm ， N_0 ， μ 以及 λ 是决定 Gamma 分布谱的三个参数。根据前人已有的研究结果，自然条件下不同云类中冰晶分布谱其 λ 值的分布范围较为广泛，集中于 $1 \sim 10^3 \text{cm}^{-1}$ 范围内，但是统计结果亦表明 N_0 值与 λ 值之间存在一定的相互关系

(Heymsfield et al., 2014)。基于前人已有的观测统计经验，本文选择了几种 Gamma 谱分布和几种典型形态冰晶情况作为代表，模拟计算了三波长雷达观测参量。

4.1 雷达反射率因子模拟

使用下文（6）式右侧表达式，我们计算了不同粒子谱、形态以及不同观测角度条件下雷达等效反射率因子 Z_e （下文将等效反射率因子简称为反射率）的分布情况（见图 8），这里设定粒子指向为无规则随意分布，粒子指向角度 0° 。为了便于在图中表示，我们将不同的粒子谱分布，根据下式（5）换算成了冰水含量（IWC）：

$$IWC = \sum_{D_{min}}^{D_{max}} n(D)m(D) \tag{5}$$

，上式中 D 为粒子直径，单位为 m，IWC 的单位为 gm^{-3} ， m 的单位为 kg；当 $D \geq 9.7 \times 10^{-5}m$ 时， $m(D)=0.0185 \times D^{1.9}$ ；当 $D < 9.7 \times 10^{-5}m$ 时， $m(D)=480 \times D^3$ 。

图 9. 不同 Gamma 分布时，四种粒子形态纵横轴比分别为 0.2,1.0,2.0,5.0 时的椭球体，在垂直向上和仰角 46° 观测时的三波长雷达各自观测的反射率情况：实线为 Ka 波段，虚线为 X 波段，点实线为 W 波段。"E"表示仰角。

Fig. 9. Reflectance of each of the three-wavelength radar observations of the ellipsoid at different Gamma distributions for the four type particles with horizontal-to-vertical axis ratios of 0.2,1.0,2.0, and 5.0, respectively, observed vertically upward and at an elevation angle of 46° : the solid line is in the Ka-band, dashed line is in the X-band, and the dotted solid line is in the W-band. "E" is elevation angle.

表 2 12 种 Gamma 分布谱参数及相应的 IWC
Table 2 The N_0 , μ , λ and IWC of 12 Gamma distributions

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
参数												
N_0	0.669	1.257	2.779	7.549	26.56	129.4	950.2	11690	275500	1.47E7	2.20E9	1.21E12
μ	-0.795	-0.552	-0.259	0.093	0.517	1.026	1.638	2.373	3.258	4.321	5.6	7.137
λ	31.62	39.81	50.12	63.10	79.43	100	125.89	158.49	199.53	251.19	316.23	398.11
IWC	1.335	0.744	0.381	0.178	0.076	0.029	0.010	0.003	8.717E-4	2.198E-4	5.089E-5	1.115E-5

所选 12 种分布谱形式中粒子直径的分布范围统一为 $5 \sim 1500 \mu m$ ，不同的 μ 以及 λ 值决定了 IWC 分布在 $10^{-5} \sim 1.3 gm^{-3}$ 范围之内，自然界目前所观测的 IWC 分布范围包含其中（见表 2）。计算时选择了两种观测角度仰角 46° 和 90° ，即天顶角 44° 和 0° ，在此范围内的观测角度视其观测方向与粒子指向为大概一致。图 9 中的模拟结果可以看到，总体上雷达反射率分布于 $-40 \sim 40 dBZ$ 之间，且其与 IWC 之间存在较为明显的幂指数分布关系，这种特征与观测的统计结果一致(Heymsfield et al., 2014)。但是同样可以看到，尽管粒子谱相同，但是由于粒子形态和入射角度不同，所模拟的反射率值也各不相同。形态方面，扁椭球粒子的反射率高于球形粒子，长椭球粒子的反射率值最低，粒子越“扁”反射率越高，粒子越“长”反射率一般越低。X 波段条件下，反射率随粒子形态变化的变化幅度最小；W 波段条件下，反射率随粒子形态变化的幅度最大；Ka 波段的变化幅度居于二者之间，意味着进行微物理参数

反演时，若不考虑粒子形态的影响，在 X 波段所造成的反演误差要比 W 波段低。相同角度相同粒子谱相同形态等时，W 波段的反射率值普遍相比 X 波段和 Ka 波段低，但是差异程度与角度、形态有关。

图 10. 不同 Gamma 分布时，四种粒子形态横纵轴比分别为 0.2,1.0,2.0,5.0 时的椭球体，在垂直向上和 46° 仰角时的三波长雷达两两反射率因子差值情况：实线为 W 波段与 X 波段的反射率因子之差，虚线为 Ka 波段与 X 波段的反射率因子之差，点实线为 W 波段与 Ka 波段的反射率因子之差。"E"表示仰角。

Fig. 10. Difference in radar two-by-two reflectivity factors at three wavelengths for ellipsoids with different Gamma distributions and four horizontal-to-vertical axis ratios of 0.2, 1.0, 2.0, and 5.0, respectively, in vertical upward and at the 46° elevation angle: the solid line is the difference in the reflectivity factor between the W-band and the X-band, the dashed line is the difference between the reflectivity factor of the Ka-band and the X-band, and the dotted line is the difference in the reflectivity factor between the W-band and the Ka-band. "E" is elevation angle.

为了更清楚地认识不同形态谱分布条件下的冰晶粒子在不同波长雷达反射率因子之间的差异，我们将它们之间的差值进行了计算（见图 10，DZ 表示反射率因子的差值）。总体来看，虚线表示的 X 波段和 Ka 波段之间的差值相对最小，约 90%的差值范围±2dBZ 之间，差值在±2dBZ 范围之外的情况主要出现在长椭球粒子。W 波段与 X 波段、W 波段与 Ka 波段之间的差异就明显增大了，主要原因是在 W 波段由于波长较短，粒子散射对角度、形态等的改变较为敏感和复杂，在这其中同样也是长椭球粒子的差异程度表现得更大。

进一步分析发现，扁平椭球粒子 Ka 波段雷达回波反射率值要大于 X 波段反射率，但是其他粒子和波段条件下的差值则有正有负，利用此特征若 Ka 回波高于 X 波段则可能表示云中也许存在扁椭球形的粒子，接近 0 时可能为球形粒子，当 Ka 波段反射率小于 X 波段时，可能是长椭球粒子，当然这一条件是基于观测方向与粒子指向为大概一致情况下。另外，图中也可看到，W 波段与 Ka 波段或 W 波段与 X 波段之间差值明显较大时，例如低于-3dBZ 时的情况主要来自长椭球粒子，此特征也许亦可作为一个标志判断云中是否有“长”粒子。

4.2 粒子形状与 LDR

图 11 不同 Gamma 分布时，四种粒子形态横纵轴比分别为 0.2, 1.0, 2.0, 5.0 时的椭球体，在垂直向上和 46°仰角观测时的三波长雷达各自观测的 LDR 情况：实线为 Ka 波段，虚线为 X 波段，点实线为 W 波段。"E"表示仰角。

Fig. 11. LDRs at different Gamma distributions for four type particles with horizontal-to-vertical axis ratios of 0.2, 1.0, 2.0 and 5.0 for three-wavelength radar in vertical upward direction and at an elevation angle of 46°: the solid line is for the Ka band, the dashed line is for the X band, and the dotted solid line is for the W band. "E" is elevation angle.

根据 Ryzhkov(Ryzhkov et al., 2009)，LDR 的计算方法如下：

$$Z_{hh} = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K_w|^2} \int \left\{ \left| f_b^{(\pi)} \right|^2 - 2R_e \left[f_b^{(\pi)*} \left(f_b^{(\pi)} - f_a^{(\pi)} \right) \right] A_2 + \left| f_b^{(\pi)} - f_a^{(\pi)} \right|^2 A_4 \right\} n(D) dD \quad (6)$$

$$Z_{vh} = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K_w|^2} \int \left\{ \left| f_b^{(\pi)} - f_a^{(\pi)} \right|^2 A_5 \right\} n(D) dD \quad (7)$$

$$LDR = Z_{vh}/Z_{hh} \quad (8)$$

上式中 K_w 为水的介电因子, 取值为 0.92; *代表共轭, $f_a=S_{11}, f_b=-S_{22}$, S_{ij} 为 2×2 T 矩阵的散射幅度场元素 (scattering amplitude); R_e 表示取复数的实部, Z_{hh} 表示水平发射水平接收, Z_{vh} 表示水平发射垂直接收。当粒子指向呈无规则随意分布时, 上式中有 $A_l=1/3, A_t=1/5, A_s=1/15$ 。LDR 的分布图相比 Z_e 的分布图要“简洁”, 原因是一些值相同的线段重叠在一起, 例如球形粒子条件下, 三种波长的 LDR 值都为 0; 入射角与粒子旋转轴方向一致时, LDR 值也为 0。非球形时, 粒子形态相同情况下时, 即使观测角度不同, 但 Ka 和 X 波段的 LDR 基本一样, 说明应用 LDR 值用于判断粒子形态时可以不考虑入射角度的影响。相同波段、相同粒子谱分布和入射角条件下, 横纵轴比为 0.2 的粒子其 LDR 值多数时候介于横纵轴比为 5.0 和横纵轴比为 2.0 的粒子之间, 此时仅依靠 LDR 值无法区分是长椭球粒子或是扁椭球粒子。另外仔细分析发现, 横纵轴比为 0.2 的长粒子其 W 波段的 LDR 值明显低于 X 波段和 Ka 波段, 而另外几个相态情况下这个差异要小很多。综合以上模拟结果, 可以推断 LDR 值为 0 时粒子为球形的概率很大 (多为云滴), 而当 LDR 值不为 0 时一定为非球形粒子; 但仅用 LDR 值较难区分是长椭球粒子还是扁椭球粒子乃至粒子的横纵比; W 波段与 Ka 波段或 X 波段的 LDR 值差异较大时, 长轴粒子的可能性大。

5. 结论与讨论

短波/毫米波雷达在天气探测领域具有独特优势, 由于其波长较短, 对于云滴粒子这类尺度较小的目标更为敏感, 这使得它在探测非降水云时表现出色。非降水云, 包括降水系统前期的初生云场, 在自然界中占据了绝对优势, 因此短波/毫米波雷达的探测能力显得尤为重要。我国虽然在这一领域起步较晚, 但近年来的发展势头迅猛, 双波长、三波长雷达探测技术的实现, 不仅填补了技术空白, 还为深入研究云的内部结构特征、云降水形成过程和机制等提供了有力的技术支持。然而, 尽管探测技术已经实现了较好的发展, 但我们对多波长短波雷达联合探测云能力的理论认识和分析工作还有较大研究空间。本文在研究团队前期已有工作基础之上, 对联合应用多波长短波雷达在多种形态粒子 (主要指冰晶) 的探测、主要影响因素及粒子形态区分等方面进行模拟研究与分析。通过模拟计算和对比分析, 获得的主要结论有:

(1) 温度是改变粒子散射能力的影响因素之一, 但不同波段条件下的影响程度不同。计算结果表明, 在 X 波段条件下, 粒子后向散射受温度的影响较小, 可忽略; 但是, W 波段条件下, 液态云滴的后向散射受温度的影响不可忽视; Ka 波段条件下的情况则介于 X 和 W 波段之间, 其随粒子尺度的变化情况相对简单, 对温度的影响可做适当简化处理。

(2) 对于非球形粒子, 入射角度不同会改变粒子后向散射。X 和 Ka 波段时入射角度的改变引起的后向散射改变的幅度相对由于粒径大小改变而产生的变化幅度小; 与之相比 W 波段随入射角改变导致的变化幅度则非常显著, 且入射角度与后向散射的变化程度还与粒子

的形状和大小密切相关：粒子横纵轴比越大，离球体形状越远，入射角度的改变所产生的变化越大。

(3) 粒子形态不同，后向散射随雷达波长的不同所呈现的分布特征显著不同。X 和 Ka 波段条件下，不同形状下的冰晶粒子后向散射随尺度成单调缓慢递增或缓慢递减的曲线，然而在 W 波段，变化形式呈现为有拐点的曲线，甚至在长圆柱和长椭球粒子时出现了两处拐点且变化幅度远高于 X 和 Ka 波段。在波长较短的 W 波段，粒子形状的影响变得非常显著且变化程度还与粒子自身的尺度相关。

(4) 讨论了联合利用三波长雷达反射率区分冰晶形态的可能性。对于冰晶，观测方向和粒子指向方向一致时，模拟结果显示扁平椭球粒子 Ka 波段雷达回波反射率值一般大于 X 波段的反射率，基于此特征若 Ka 回波高于 X 波段则可能表示云中存在扁椭球形粒子的可能性增大；W 波段与 Ka 波段或 W 波段与 X 波段之间差值明显较大时，例如低于 -3dBZ 时，标志着可能存在长椭球粒子。

(5) 相比反射率之间的差异，三个波长 LDR 值之间的差异低了很多。LDR 值为 0 时云中粒子多为球形；当 LDR 值不为 0 时，存在非球形粒子；仅依赖单一波长的 LDR 值较难无法识别粒子的具体形态；当 W 波段与 Ka 波段或 W 波段与 X 波段之间的 LDR 值差异较大时，例如低于 -2dBZ 时，长轴粒子的可能性大。

尽管波长越短，雷达灵敏度越强，但是由于波长较短与云中的冰晶粒子尺度更加接近，导致 W 波段探测条件下的冰晶后向散射特征相比 X 波段和 Ka 波段要复杂很多，入射角度、粒子形态、粒子大小等的不同均会引起后向散射的相对“较大”的改变，这些因素都为基于 W 波段雷达回波来反演云粒子微物理特征形成挑战，以往基于 X 波段或 Ka 波段所形成的一些统计或经验拟合算式，若应用于 W 波段上显然会产生相对较大的误差。另一方面，深度学习方法在云微物理参数反演方面可能具有较好的应用潜力。首先，深度学习具备较好的特征学习和分类能力，有助于实现从雷达数据中提取云滴、冰晶等粒子的形态、大小、分布等特征，通过对大量样本的学习，实现对不同云微物理特性的分类和识别。其次，自然云中冰晶分布特征复杂呈现非线性特性，深度学习模型可处理这种复杂的非线性关系。此外，深度学习还可结合多源数据（如光谱数据、辐射数据等）进行融合分析，有助于充分利用各种数据信息，提高云微物理特性的探测精度。受篇幅限制，本文仅采用了有限的个例作为代表分析了其中的一些特征。未来，研究团队将开展更多例如分布谱、粒子形态、角度等的模拟分析工作，并尝试使用深度学习的方法开展微物理特征提取工作。

参考文献 (References)

- Baran, A. J., 2012. From the single-scattering properties of ice crystals to climate prediction: A way forward[J]. Atmos. Res., 112, 45-69.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.04.010>.

- 毕永恒, 霍娟, 吕达仁, 等. 2022. 西藏羊八井 Ka&W 双频毫米波云雷达性能及观测分析 [J]. 红外与毫米波学报, 41(2): 470–482.
- Bi Yongheng, Huo Juan, Lyu Daren, et al. 2022. Ka&W dual-frequency millimeter-wave cloud radar at Yangbajing——Performance and comparison [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves (in Chinese), 41(2): 470–482. doi:10.11972/j.issn.1001-9014.2022.02.014
- 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 in snow observation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(1): 134–149. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.17121
- Heymsfield, A. J., Winker, D., Avery, M., et al. 2014. Relationships between ice water content and volume extinction coefficient from in situ observations for temperatures from 0°C to - 86°C : Implications for spaceborne lidar retrievals[J]. J. Appl. Meteorol., 53, 479-505. <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-13-087.s1>.
- Heymsfield, A. J., Krämer, M., Luebke, A., et al. 2017. Cirrus clouds[M]. Meteorological Monographs, 58, 2.1-2.26. doi: 10.1175/amsmonographs-d-16-0010.1.
- 胡帅. 2018. 大气非球形粒子散射计算模型研究及其应用[D]. 国防科技大学博士学位论文, 219pp. Hu Shuai. 2018. Research on the numerical computational models and application of the scattering properties of nonspherical atmospheric particles[D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Graduate School of National University of Defense Technology, 219pp.
- 黄敏松, 雷恒池, 王秀娟. 2020. 改进阈值的冰晶粒子形状分类方法及其应用[J]. 气候与环境研究, 25(4): 419–428. Huang Minsong, Lei Hengchi, Wang Xiujuan. 2020. Ice Particle Habit Classification Method with Improved Thresholds and Its Application [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (4): 419–428. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19061
- 霍娟, 段民征, 韩琰峥, 等. 2024. 三频雷达遥感云参数能力的模拟与初步分析[J]. 大气科学, 48(5/4). Huo Juan, Duan Minzheng, Han Congzheng, et al. 2024. Triple-frequency Radar Simulations for Liquid Cloud Droplets [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48(5/4) . doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2212.22132.
- Kuhn, T., Heymsfield, A. J. 2016. In situ balloon-borne ice particle imaging in high-latitude cirrus[J]. Pure Appl. Geophys., 173, 3065-3084. doi: 10.1007/s00024-016-1324-x.
- Kollias P, Bharadwaj N, Clothiaux E E, et al. 2020. The ARM radar network: At the leading edge of cloud and precipitation observations [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 101(5): E588–E607. doi:10.1175/BAMS-D-18-0288.1.
- Liou, K.N.2004. 大气辐射导论 (第二版)[M].气象出版社.
- 李浩然, 阮黎平, 等. 2023. 地基多波长雷达垂直探测云降水微物理特征研究进展[J]. 暴雨灾害, 42(4):361-371. Li Haoran, Ruan Zheng, Liu Liping, et al. 2023. Research progress in profiling cloud and precipitation microphysics characteristic with ground-based multi-frequency radars [J]. Torrential Rain and Disasters, 42(4):361-371 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-075.
- 刘黎平, 谢蕾, 崔哲虎. 2014. 毫米波云雷达功率谱密度数据的检验和在弱降水滴谱反演中的应用研究 [J]. 大气科学, 38: 223–236. Liu Liping, Xie Lei, Cui Zhehu. 2014. Examination and application of Doppler spectral density data in drop size distribution retrieval in weak precipitation by cloud radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(2): 223–236. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12207
- Miles, N. L., Verlinde, J., Clothiaux, E. E. 2000. Cloud droplet size distribution in low-level stratiform clouds[J]. Journal of the Atmospheric Sciences 57, 295-311,
- Mishchenko, M., Travis, L., Mackowski, D. 1996. T-matrix computations of light scattering by nonspherical particles: A review[J]. J.Quant.Spectrosc.Radiat.Transfer, 55, 535-575.
- Mishchenko, M., Travis, L. Macke, A. 2000. T-matrix method and its applications. In Light Scattering by Nonspherical Particles: Theory, Measurements, and Applications, eds. M. I. Mishchenko, J.W. Hovenier, and L. D. Travis, pp.147-172 (Academic Press, San Diego).
- Mishchenko, M. I., Travis, L. D., Lacis, A. A. 2002. Scattering, absorption, and emission of light by small particles[M]. Cambridge University Press, UK.

- Mróz, K., Battaglia, A., Kneifel, S., D'Adderio, et al. 2020. Triple-frequency doppler retrieval of characteristic raindrop size[J]. *Earth and Space Science*, 7. <https://doi.org/10.1029/2019EA000789> doi: <https://doi.org/10.1029/2019EA000789>.
- Oue, M., Kunjian, M. R., J. Verlinde, Y. Lu et al. 2015. Linear depolarization ratios of columnar ice crystals in a deep precipitating system over the Arctic observed by zenith-pointing Ka-band Doppler radar[J]. *J Appl Meteorol Climatol*, 54, 1060-1068. doi:10.1175/JAMC-D-1015-0012.1061.
- Oue, M., Tatarevic, A., Kollias, P., et al, 2020. The cloud-resolving model radar simulator (CR-SIM) version 3.3: Description and applications of a virtual observatory[J]. *Geosci. Model Dev.*, 13, 1975-1998. doi: 10.5194/gmd-13-1975-2020.
- Ryzhkov, A., Pinsky, M., Pokrovsky, A., Khain, A., 2011. Polarimetric radar observation operator for a cloud model with spectral microphysics[J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 50, 873-894. doi:10.1175/2010JAMC2363.1.
- 孙海冰.1998.非球形降水粒子散射吸收特征与降水被动微波遥感研究[D].中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 170pp. Sun Haibing. 1998. Scattering and absorption characteristics of nonspheric raindrop and passive microwave remote sensing of precipitation[D].Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics,170pp.
- van de Hulst, H.C. 1957. Light scattering by small particles[M]. John Wiley & Sons, New York.
- 吴举秀. 2014. 94GHz 毫米波云雷达测云能力研究与回波分析 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文, 148pp. Wu Juxiu. 2014. Study on the detection ability and the echoes of 94 GHz millimeter-wave cloud radars [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology, 148pp.
- Zhu, Z., Lamer, K., Kollias, P., et al. 2019. The vertical structure of liquid water content in shallow clouds as retrieved from dual-wavelength radar observations. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 124, 14,184–114,197.<https://doi.org/10.1029/2019JD031188>.
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 2000. 雷达气象学 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 499pp. Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi. Radar Meteorology (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 499pp.