

太赫兹波段融化冰晶粒子的光学特性研究

张学海¹, 刘文博¹, 李 瑶^{2*}, 李益文², 张欣慧¹, 邹曙光¹, 李卫东¹, 赵颜创¹

(1. 河南工业大学 信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 空军工程大学 航空工程学院 航空动力系统与等离子体技术全国重点实验室, 陕西 西安 710038)

摘 要: 冰晶粒子在融化过程中会形成复杂的混合态特征, 进而影响其光学和辐射特性, 对全球辐射效应和天气预报等研究具有重要影响。文中提出了一种非球形非均匀混合模型用于模拟冰晶粒子融化过程中的形态和混合态, 并采用离散偶极子近似 (Discrete Dipole Approximation, DDA) 法系统研究了 3~640 GHz 范围内融化冰晶粒子的光学特性随频率、纵横比、冰水混合比 (Ice-to-Water Mixing Ratio, IWMR) 等参数的变化规律。研究结果表明: 不同融化阶段冰晶粒子的光学特性 (消光效率因子、散射效率因子、不对称因子、散射相矩阵) 存在较大的差异。具体表现为, 融化冰晶粒子粒径越大, 其消光效率因子、散射效率因子和不对称因子随频率变化的振荡幅度越大, 融化冰晶粒子散射相矩阵元素的振荡越大, 随着频率的增大, 融化冰晶粒子散射矩阵元素的振荡也越大。随着冰晶粒子的融化, 整体上这些光学参数随 IWMR 的降低呈现出规律性的变化, 这也意味着忽略冰晶粒子的融化过程可能会导致错估其光学特性。研究结果还表明, 冰晶粒子形态对消光效率因子、散射效率因子和不对称因子的影响主要在融化前期。当融化程度较低 ($IWMR=0.8$) 且尺度参数大于 2.3 时, 冰晶核纵横比对其所有的光学特性参数均有着明显影响。当融化程度较高 ($IWMR=0.4$) 时, 冰晶核纵横比对其粒子消光效率、散射效率和不对称因子等非散射角光学参数的影响基本可以忽略, 但是随着粒子粒径的增大, 冰晶核纵横比对粒子散射矩阵元素仍具有显著影响。研究结果可以为进一步理解冰云微物理特性演变规律、提升冰水含量反演精度等研究提供参考。

关键词: 冰晶粒子; 融化过程; 光散射; 离散偶极子近似法

中图分类号: P401; O431; P407.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240547

引用格式: ZHANG Xuehai, LIU Wenbo, LI Yao, et al. Optical properties of melting ice crystal particles in the terahertz band[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(6): 20240547.

张学海, 刘文博, 李瑶, 等. 太赫兹波段融化冰晶粒子的光学特性研究[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(6): 20240547.

0 引 言

冰云由不同形态的冰晶粒子组成, 其分布非常广泛, 平均覆盖了地球上空的 20%~50%^[1]。冰晶粒子对大气系统具有重要影响, 可以通过反射和吸收太阳短波辐射和地表长波辐射等对全球辐射平衡和气候造成重要影响, 在地气系统的辐射平衡中扮演着重要的角色^[2-3]。冰云的辐射特性取决于其微物理特性, 包括冰晶颗粒的形状、折射率和尺寸分布等^[4]。因此, 准

确模拟冰晶的光学性质对地球大气系统辐射传输、气候模式、遥感反演等研究均具有重要意义^[5-6]。

早期研究人员把冰晶粒子的形状假定为球形进行理论研究。随着研究的深入, 近几十年来, 冰晶粒子的模型逐渐发展为简单的几何形状, 如六棱柱状、圆柱状、子弹花状等^[7-8]。然而, 大气中的真实的冰晶粒子形态要比标准模型复杂得多^[9]。冰晶粒子的融化过程是一个非常常见但极其重要的过程, 例如, 层状

收稿日期: 2024-11-27; 修订日期: 2025-03-06

基金项目: 国家科技重大专项基础研究项目 (J2019-V-0008-0102); 国家自然科学基金项目 (42307560); 河南省重点研发项目 (241111211100); 河南省高等学校重点科研项目 (25B170004); 河南省科技攻关计划项目 (222102320087)

作者简介: 张学海, 男, 副教授, 博士, 主要从事大气气溶胶光学特性方面的研究。

通讯作者: 李瑶, 女, 副教授, 博士, 主要从事大气等离子体技术及辐射传输方面的研究。

降雨在中高纬度地区很普遍,冰晶粒子经过融化层时会逐步融化为雨滴^[10],其形态和混合态等微物理特性发生复杂变化,进而影响降雨过程^[11]。因此,构建准确的冰晶粒子融化模型,系统研究冰晶粒子融化过程中粒子形态、冰水含量比、粒径等参数对其光学特性的影响规律,对于融化冰晶粒子微物理与光学性质的观测与反演具有重要意义。

太赫兹波段由于对云粒子更为敏感,已经广泛应用到云相态监测、降水预报等研究中^[12]。例如在 35 GHz 频段,由于云层穿透性较好,更多用于探测较厚的云层,而当频率为 140、220 GHz 时,由于对云粒子结构更加敏感,而更多用于获得冰云的精细结构^[13-16]。然而,目前对于太赫兹波段的应用仍然局限在少数的频段,针对融化冰晶粒子在宽频段光谱特性的研究仍然非常匮乏。掌握冰晶粒子及其融化过程中的光谱特性,对于更好地开展多频段联合探测冰晶粒子微物理特性、提高降水预报精度等研究均具有重要意义。

因此,文中首先提出了一种非球形非均匀的融化冰晶粒子模型,并采用离散偶极子近似 (Discrete Dipole Approximation, DDA) 法模拟计算了 3~640 GHz 波段下,不同融化阶段、不同粒径的融化冰晶粒子的光学特性。具体组织如下;其次介绍了研究方法和模型的构建过程;并研究了冰晶粒子的光学特性随粒子形态、融化过程等参数的变化规律;最后得出了结果与讨论。

1 研究方法 with 模型

1.1 研究方法

离散偶极子近似法最早由 PURCELL 和 PENNY-PACKER 提出^[17],此后经过许多学者的改进,已经广泛应用于计算任意几何形状目标的散射和吸收特性^[14-16]。DRAINE 等^[18]证明了当满足公式 (1) 时,DDA 方法计算得出的消光效率因子、散射效率因子、不对称因子等结果与 Mie 散射理论的结果误差小于 1%。

$$|m|kd < 1 \quad (1)$$

式中: m 为目标粒子的复折射率; $k=2\pi/\lambda$, λ 为真空中目标粒子的入射波长; d 为偶极子之间的间距。当计

算散射相函数时,需要达到 $|m|kd < 0.5$ 的精度。冰晶和水的复折射率由 SEGELSTEIN 和 WARREN^[19-20] 得到。

粒子的消光效率因子 Q_{ext} 、散射效率因子 Q_{sca} 、不对称因子 g 定义为:

$$Q_{\text{ext}} = \frac{C_{\text{ext}}}{A} \quad (2)$$

$$Q_{\text{sca}} = \frac{C_{\text{sca}}}{A} \quad (3)$$

$$g = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \cos \theta \cdot P_{11}(\theta) d \cos \theta \quad (4)$$

式中: C_{ext} 、 C_{sca} 分别为粒子的消光和散射截面; A 为粒子几何投影的面积; θ 为散射角。

对于随机取向的旋转对称粒子,其散射相矩阵为:

$$\begin{bmatrix} P_{11}(\theta) & P_{12}(\theta) & 0 & 0 \\ P_{12}(\theta) & P_{22}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33}(\theta) & P_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & -P_{34}(\theta) & P_{44}(\theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: C_{ext} 、 C_{sca} 分别为粒子的消光和散射截面; A 为粒子几何投影的面积; θ 为散射角。

$$\frac{1}{2} \int_0^\pi P_{11}(\theta) \sin(\theta) d\theta = 1 \quad (6)$$

粒子的尺度参数的定义为:

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (7)$$

式中: r 为粒子的等效半径。

1.2 融化的冰晶粒子模型

文中采用冰晶粒子中最常见的六棱柱作为基础模型来构建其融化冰晶模型,冰晶粒子的纵横比为 $L/2a$,其中 L 为六棱柱的高, a 为六棱柱的底边长。冰晶粒子的融化过程如图 1 所示。

文中使用冰水混合比 (Ice-to-Water Mixing Ratio, IWMR) 代表冰晶粒子不同的融化阶段,其定义如下:

$$IWMR = \frac{V_{\text{ice}}}{V_{\text{ice}} + V_{\text{water}}} \quad (8)$$

式中: V_{ice} 表示融化过程中冰晶核的体积; V_{water} 表示融化过程中水的体积。当 $IWMR=1$ 时,粒子为冰晶粒子;当 $IWMR=0$ 时,粒子为水滴粒子。

如图 1 所示,该研究将冰晶粒子的融化过程系统地分为五个不同的阶段。初始状态为纯冰晶粒子

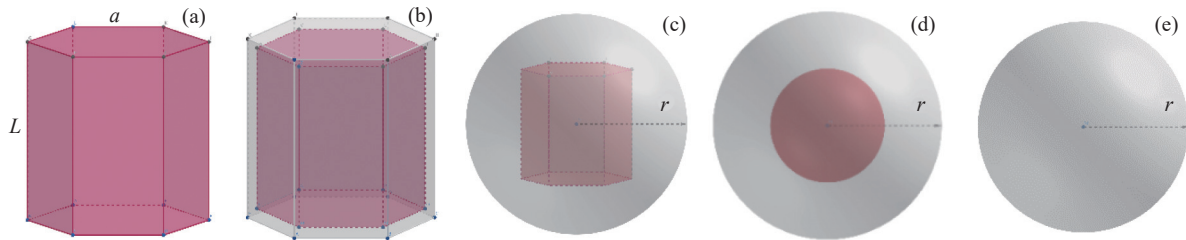


图 1 融化冰晶粒子参数化模型

Fig.1 The schematic of the melting ice crystal particle

(图 1(a), $IWMR=1$); 刚开始融化时, 六棱柱冰晶颗粒表面覆盖着一层薄的六角棱柱形水膜 (图 1(b), $0.7 \leq IWMR < 1$); 随着冰晶粒子的进一步熔化, 水膜的形状从六棱柱形变为球形 (图 1(c), $0.3 \leq IWMR < 0.7$); 随后, 冰晶核的形状从六棱柱形变为球形 (图 1(d), $0 < IWMR < 0.3$); 最后, 冰晶颗粒完全融化成球形水滴

(图 1(e), $IWMR=0$)。

在研究融化过程对冰晶粒子光学特性的影响时, 固定粒子的纵横比 $L/2a$ 为 1。在研究纵横比的影响时, 分两种情况——较高融化程度 ($IWMR=0.4$) 和较低融化程度 ($IWMR=0.8$) 来进行讨论。不同频率下冰晶和水的复折射率如表 1 所示。

表 1 不同频率下冰晶和水的复折射率^[19-20]

Tab.1 Complex refractive indices of ice crystals and water at different frequencies^[19-20]

Frequency/GHz	Ice		Water	
	Real	Imaginary	Real	Imaginary
3	1.786 1	0.000 100 52	8.743 1	0.640 9
30	1.786 1	0.000 987 14	5.879 4	2.83
94	1.786 4	0.003 141 0	3.497 5	2.161 5
160	1.786 7	0.004 576 9	2.819 4	1.604 1
220	1.786 8	0.005 110 8	2.557 5	1.302 5
280	1.787 9	0.007 714 0	2.425 8	1.097 3
340	1.788 9	0.009 811 2	2.354 6	0.971 92
400	1.789 5	0.011 276	2.290 2	0.872 63
460	1.79	0.012 363	2.255 2	0.793 59
520	1.790 4	0.013 184	2.227 8	0.746 94
580	1.790 7	0.013 861	2.198 6	0.710 56
640	1.792 1	0.015 823	2.171 2	0.678 27

2 研究内容

2.1 不同粒径下频率和 IWMR 对融化冰晶粒子光学特性的影响

图 2 所示为等效粒径为 200 μm 和 1000 μm 时不同 IWMR 条件下的融化冰晶粒子的 Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 随频率的变化。从图 2(a)~(c) 中可以看出, 当冰晶粒子等效粒径为 200 μm 时, 融化冰晶粒子的 Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 随频率增大整体上呈现单调递增的趋势, 且随着 IWMR 的递减, 整体呈递增趋势。随着频率的升高,

不同 IWMR 粒子之间的 Q_{ext} 差异变大, 其他参数整体上也呈现类似的规律。从图 2(d)~(f) 中可以看出, 当冰晶粒子等效粒径为 1000 μm 时, 粒子的 Q_{ext} 和 Q_{sca} 随频率增大整体上呈现振荡趋势, 粒子的 g 也出现一定的振荡趋势; 且随着 IWMR 减小, Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 的振荡程度逐渐减弱, 当 $IWMR=0$ 时, 振荡趋势基本消失。整体上, 粒子的 Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 对冰晶粒子的融化过程、等效粒径、频率等参数均表现出较强的敏感性。在冰晶粒径反演、云气候模式等研究中, 这些

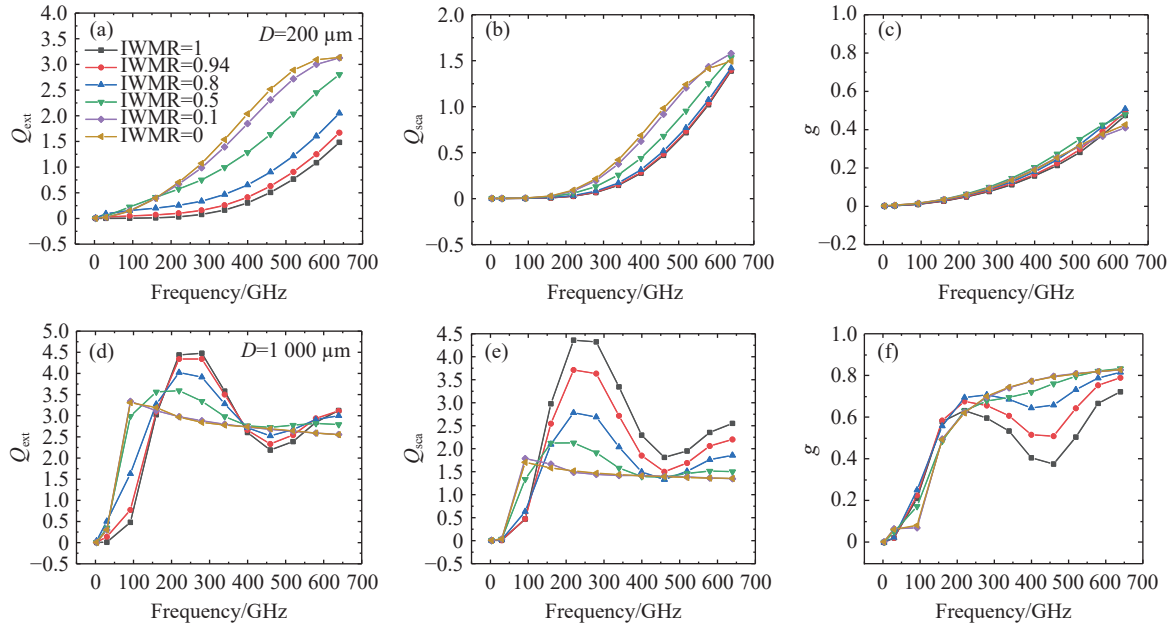


图 2 两种等效粒径下不同融化阶段的冰晶粒子光学参数随频率的变化

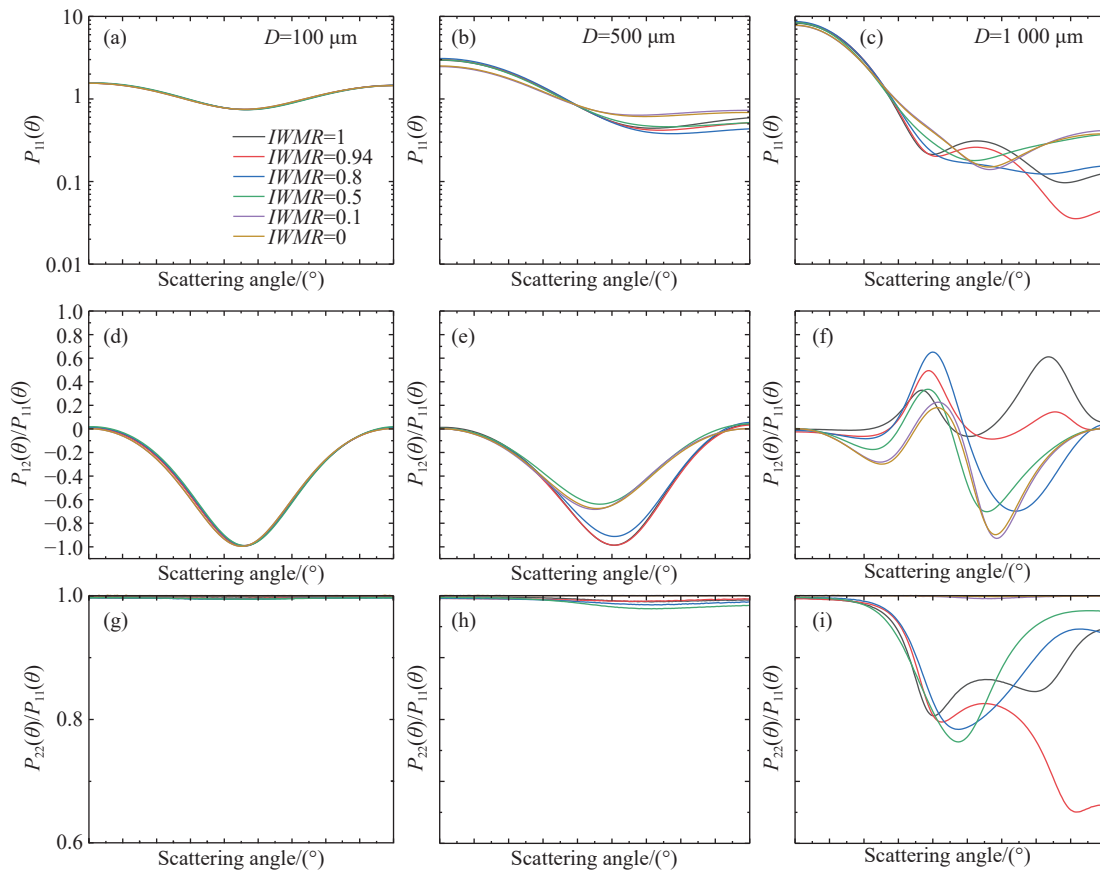
Fig.2 Optical parameters of melting ice crystal particles with frequency and IWMR at two effective dimensions

光学参数是重要的输入参数,这也意味着忽略冰晶粒子的融化过程可能导致较大的误差。

下,三种粒子等效粒径 ($D=100\ \mu\text{m}$, $500\ \mu\text{m}$, $1000\ \mu\text{m}$) 下融化冰晶粒子散射矩阵元素随散射角的变化。

图 3 和图 4 所示为在 220 GHz 和 580 GHz 条件

从图 3 中可以看出,当粒子等效粒径较小时,不



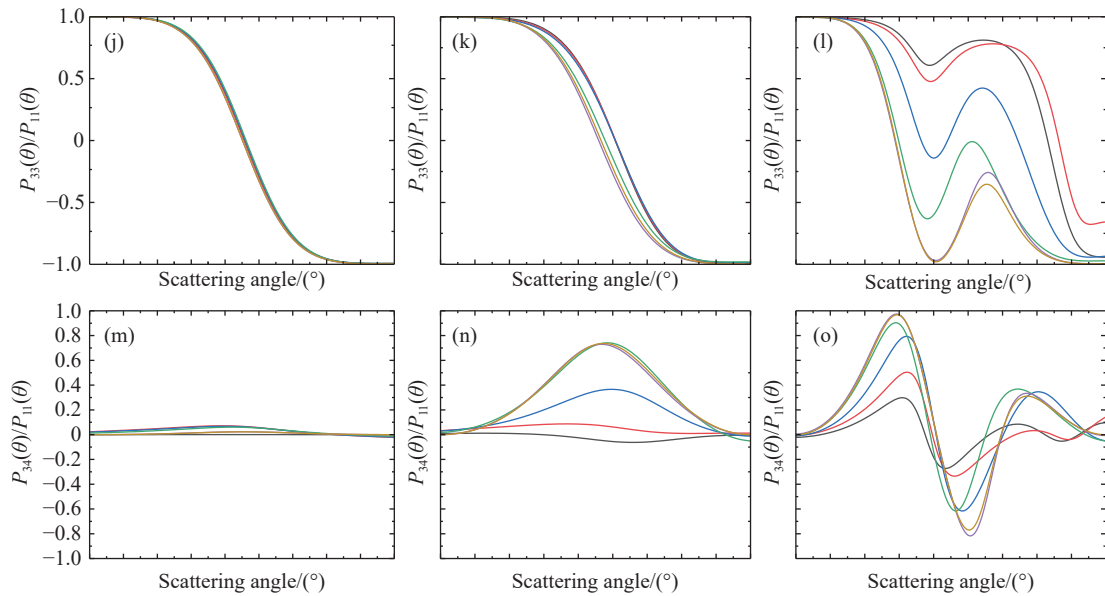
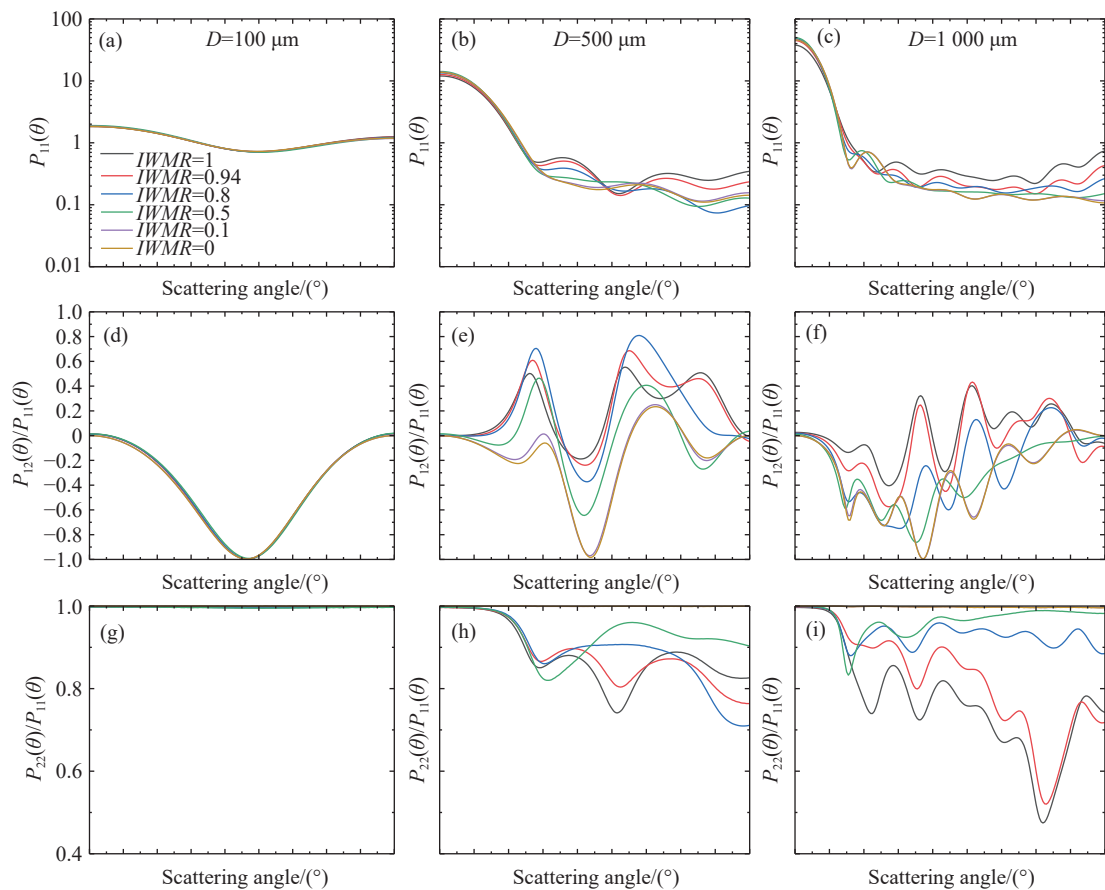


图3 频率为 220 GHz 时, 三种等效粒径条件下不同 IWMR 的散射相矩阵

Fig.3 Scattering matrix of melting ice crystal particles for the three selected effective dimensions at 220 GHz

同 IWMR 条件下的融化冰晶粒子的散射相矩阵元素差异很小, 这是由于此时的散射基本以瑞利散射为主, 与粒子本身性质基本无关。随着等效粒径的增

加, 散射相矩阵元素振荡加强, 不同 IWMR 条件下的散射相矩阵元素的差异增大, 但是 $IWMR=0.1$ 条件下的散射相矩阵元素与水滴的散射相矩阵元素基本重



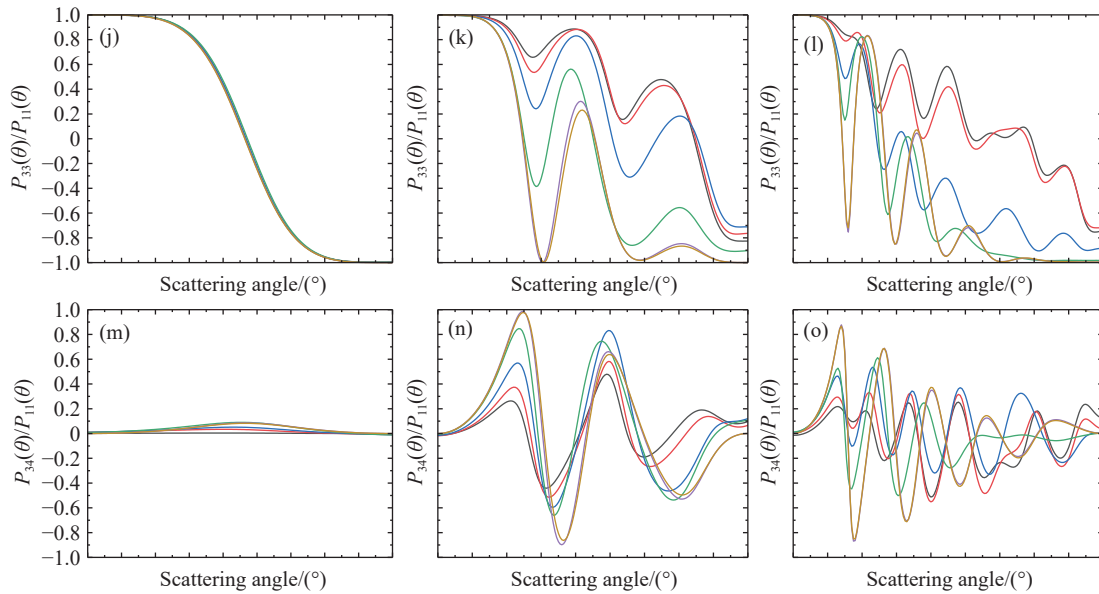


图 4 580 GHz 下三种等效粒径的融化冰晶粒子散射矩阵元素变化趋势

Fig.4 Scattering matrix of melting ice crystal particles for the three selected effective dimensions at 580 GHz

合,这意味着当融化程度较高时,冰晶核对粒子散射相矩阵的影响基本可以忽略。当粒子等效粒径为 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 时,从 $P_{22}(\theta)/P_{11}(\theta)$ 可以看出,对于大多数 IWMR, $P_{22}(\theta)/P_{11}(\theta)$ 均不为 1,表明融化冰晶粒子仍存在较强的非球形特性。从其他散射相矩阵元素也可以看出,冰晶粒子的融化过程会对其散射矩阵元素造成重要影响,因此,在冰晶粒子光学特性模拟及反演等研究过程中应该考虑冰晶粒子的融化过程造成的影响。

从图 4 可以看出,在 580 GHz 波段下,随着等效粒径的增加,散射相函数 $P_{11}(\theta)$ 随散射角的变化振荡增强,呈现前向散射增强,后向散射减弱的趋势,并且整体上散射相函数随散射角的变化与冰晶粒子的融化程度密切相关。其它的散射相矩阵元素也呈现出这一规律性的变化。相比 220 GHz 波段,随着粒子等效粒径的增大,散射相矩阵元素的振荡更加剧烈,且

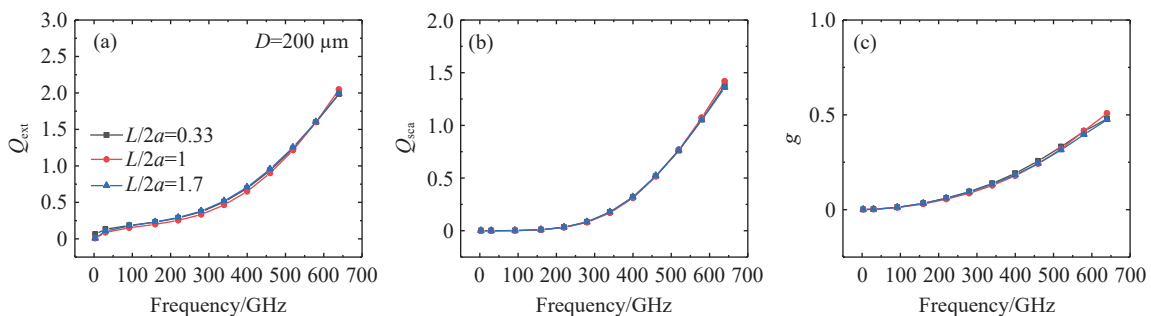
呈现出较强的不规律性,这意味着高频频段散射相矩阵元素对冰晶粒子的微观特性的响应关系更加复杂,在探测或反演冰晶粒子的融化程度时,可以选择低频频段进行研究。

2.2 不同粒径下频率和纵横比对融化冰晶粒子光学特性的影响

选取 $IWMR=0.8$ (融化程度较低,采用图 1(b) 模型) 和 $IWMR=0.4$ (融化程度较高,采用图 1(c) 模型) 两种情况,假定纵横比参数分别为 $L/2a=0.33$ 、 $L/2a=1$ 和 $L/2a=1.7$,研究不同融化程度下,冰晶核形态对其光学特性的影响。

2.2.1 较低的融化程度

图 5 所示为两种等效粒径 ($200\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1000\text{ }\mu\text{m}$) 条件下,不同冰晶核纵横比的 Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 随频率的变化。从图 5(a)~(c) 中可以看出,当 $IWMR=0.8$ 且冰晶粒子粒径较小 ($D=200\text{ }\mu\text{m}$) 时,其纵横比变化对



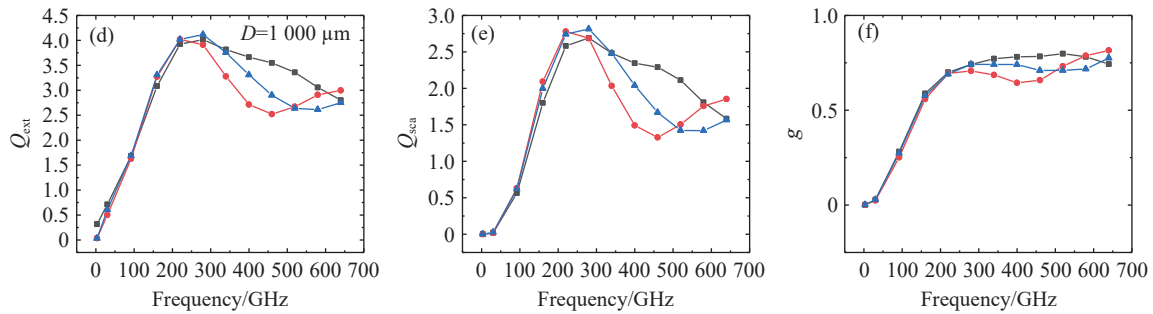


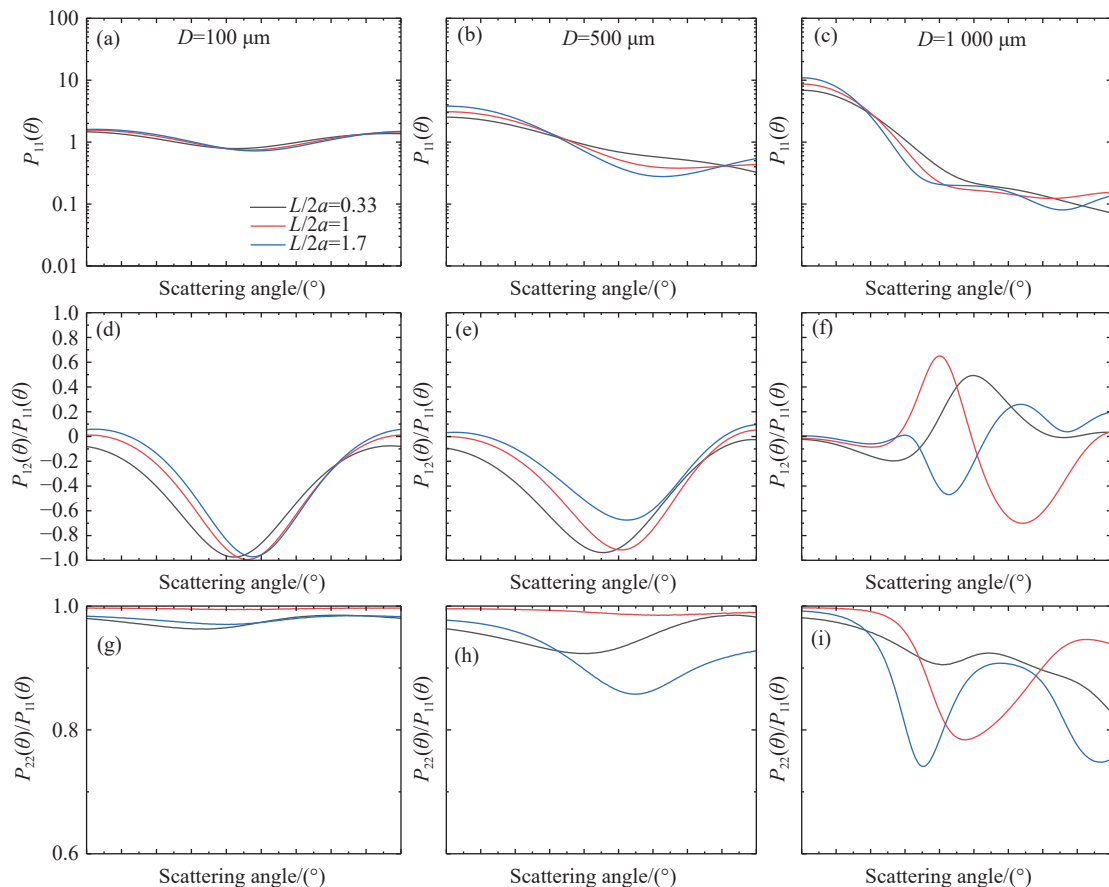
图5 两种等效粒径条件下, IWMR 为 0.8 时融化冰晶粒子的光学特性

Fig.5 Optical parameters of melting ice crystal particles with IWMR of 0.8 for two different effective dimensions

Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 基本没有影响。随着等效粒径的增大, 当等效粒径为 1000 μm 时, 冰晶粒子纵横比 (冰晶形态) 的变化对粒子光学特性的影响逐渐增大, 这意味着在融化程度较低 ($IWMR=0.8$) 时, 冰晶形态对融化冰晶粒子 Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 等非散射角光学参数的影响很大。由图 5(d)~(f) 中的数据可以得出, 当粒子尺度参数大于 2.3 时, 冰晶粒子纵横比 (冰晶形态) 对其 Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 开始产生影响。在进行融化冰晶粒子微物理特性及光学特性建模时, 需要协同考虑冰晶形态和等

效粒径的影响。

图 6 所示为频率为 220 GHz, IWMR 为 0.8 时, 三种等效粒径 (100 μm , 500 μm 和 1000 μm) 条件下, 不同纵横比冰晶核的粒子散射矩阵元素随散射角的变化。从图 6 中可以看出, 当融化程度较低、粒子等效粒径较小 (100 μm) 时, 不同纵横比的散射相函数的差异很小, 但是对于其他散射相矩阵元素, 纵横比对散射相矩阵元素的影响非常明显且具有较强的规律性, 这意味着在这种条件下, 考虑偏振信息可能更有助于



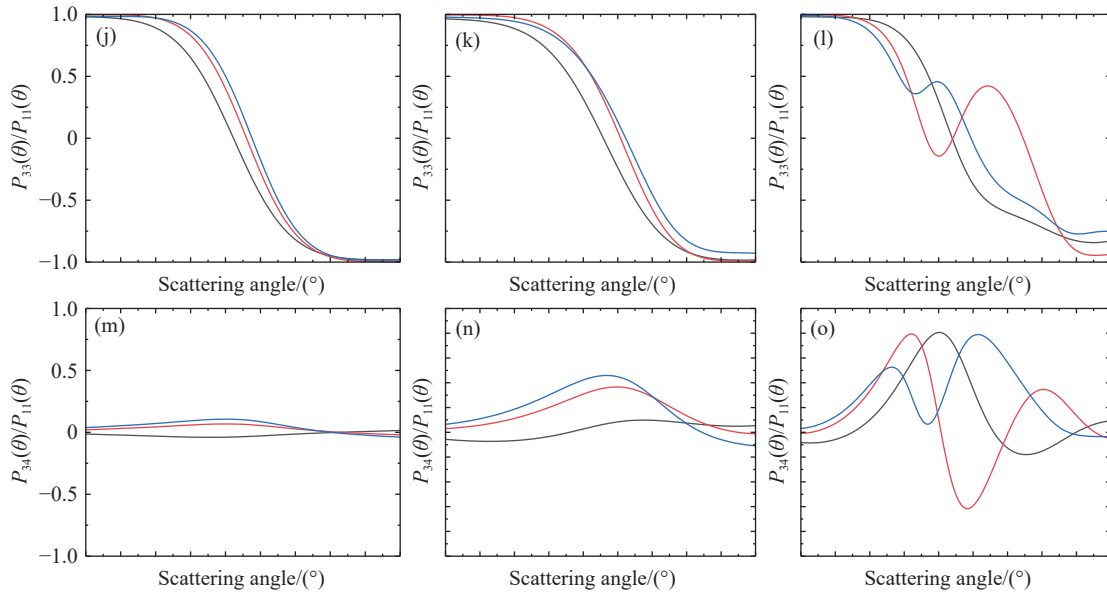


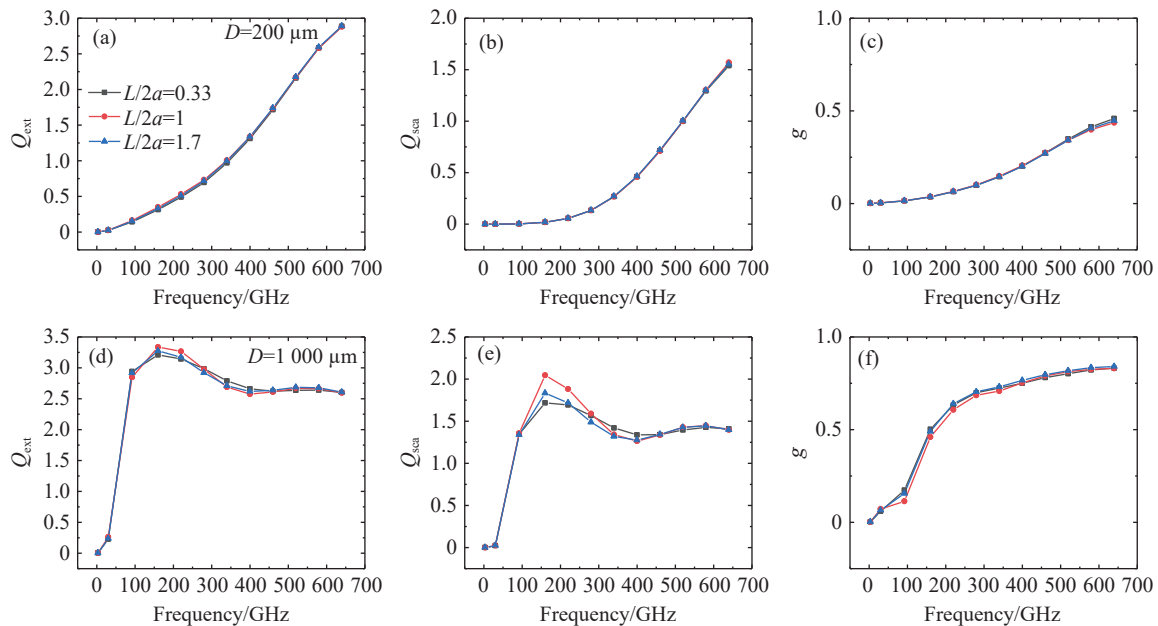
图 6 频率为 220 GHz 时, 三种等效粒径条件下不同纵横比的散射相矩阵

Fig.6 Scattering matrix of melting ice crystal particles for the three selected effective dimensions at 220 GHz

识别粒子的非球形信息。随着等效粒径的增加, 不同纵横比的散射相矩阵元素差异逐渐增大, 粒子形态对散射相矩阵元素的影响逐渐增强。因此, 对于融化程度较低冰晶粒子, 粒子形态对其散射相函数的影响主要集中在大粒径范围内, 而对小粒径冰晶粒子的影响很弱, 基本可以忽略, 但是粒子形态对其他散射相矩阵元素的影响基本覆盖所研究的整个粒径范围。

2.2.2 较高的融化程度

图 7 所示为两种等效粒径 (200 μm 和 1000 μm) 条件下, 不同冰晶核纵横比的 Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 随频率的变化。从图 8 中可以看出, $IWMR=0.4$ 时, 冰晶粒子的 Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 随频率变化的趋势基本一致, 冰晶核纵横比 (冰晶核形态) 的变化对粒子的 Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 影响很小, 这意味着在融化程度较高 ($IWMR=0.4$) 时, 可以

图 7 两种等效粒径条件下, $IWMR$ 为 0.4 时融化冰晶粒子的光学特性Fig.7 Optical parameters of melting ice crystal particles with $IWMR$ of 0.4 for two different effective dimensions

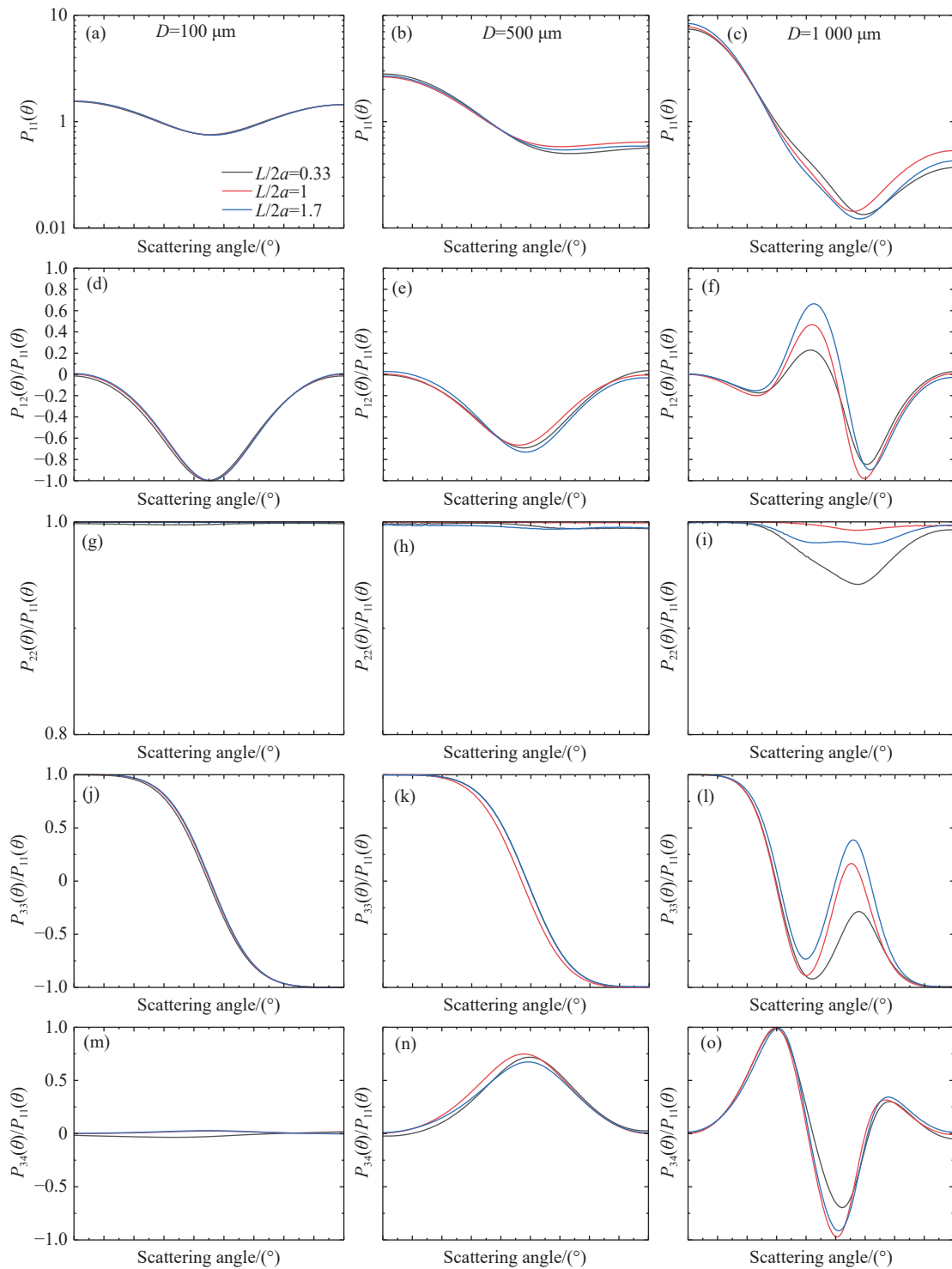


图8 频率为 220 GHz 时, 三种等效粒径条件下不同纵横比的散射相矩阵

Fig.8 Scattering matrix of melting ice crystal particles for the three selected effective dimensions at 220 GHz

忽略冰晶核形态对融化冰晶粒子 Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 等非散射角光学参量的影响。在进行融化冰晶粒子微物理特性及光学特性建模时, 可以简化冰晶核的粒子形态, 进而为简化模型参数、提高模型适用性提供参考。

图8所示为频率为 220 GHz, $IWMR=0.4$ 时, 三种等效粒径 (100 μm , 200 μm 和 1000 μm) 条件下, 不同纵横比冰晶核的粒子散射矩阵元素随散射角的变化。从图8中可以看出, 当融化程度较高 ($IWMR=$

0.4)、粒子等效粒径较小 (100 μm) 时, 不同纵横比的散射相矩阵元素差异很小, 随着粒子等效粒径的增加, 不同纵横比的散射相矩阵元素的差异逐渐增大, 粒子形态对散射相矩阵元素的影响逐渐增强。对于散射相函数 $P_{22}(\theta)/P_{11}(\theta)$ 可以看出, 随着纵横比偏离 1, 后向散射相函数均有不同程度的降低, 这表明后向散射相函数与粒子的非球形程度相关。通过其他散射相矩阵元素也可以看出, 纵横比对冰晶粒子的散射相矩阵元素均具有重要影响, 因此即使在融化程度较高时, 也不应当忽略粒子形态对其散射相矩阵特性的影响。

3 结 论

文中基于冰晶粒子融化过程中表现出的粒子形态、混合态的复杂演变过程的实际场景, 结合冰晶粒子微波遥感及反演算法研究的实际需求, 构建了融化冰晶粒子参数化模型, 并采用 DDA 方法系统研究了粒径、频率、形态和融化程度等因素对冰晶粒子的 Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 和散射相矩阵元素等光学特性的影响。结果表明: 融化冰晶粒子的 Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 与频率、融化程度、冰晶核形态以及等效粒径等参数密切相关。小粒径下, 整体呈现随频率增加而升高、随 IWMR 降低而升高的趋势, 而大粒径下则表现出更为复杂的变化趋势。散射相矩阵元素在低频和小粒径条件下随 IWMR 的变化呈现出一定的规律性变化, 而在高频和大粒径条件下随 IWMR 的变化则趋于复杂。这些特征为进一步利用低频信息反演冰晶粒子融化特性提供了理论参考。此外, 文中还讨论了在较低融化程度和较高融化程度条件下, 粒子纵横比对其 Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 、散射相矩阵的影响规律。结果表明: 冰晶核形态对冰晶粒子光学特性的影响与粒子尺度参数和融化程度有关, 当融化程度较低且粒子尺度参数大于 2.3 时, 冰晶核形态对冰晶粒子 Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 、散射相矩阵元素等参数均具有重要影响; 而当融化程度较高时, 冰晶核形态对冰晶粒子 Q_{ext} 、 Q_{sca} 、 g 的影响基本可以忽略, 但是对散射相矩阵元素仍然具有一定影响。

实际大气中, 冰晶粒子的形态非常复杂, 并且其融化过程与粒子形态、温度、湿度等多种条件有关, 因此该研究建立的模型具有一定局限性。但是面向太赫兹波段下的冰晶融化程度探测、降水预报的实际

需求, 需要构建一种可参数强的理论模型表征实际的冰晶粒子形态、混合态等微物理特性, 从这方面讲, 文中系统地探讨了太赫兹波段下融化程度、冰晶核形态、等效粒径等参数对融化冰晶粒子的影响规律, 研究结果对理解冰晶粒子融化过程中的微物理特性和光学特性的演变规律等研究具有一定的参考价值, 也可以为进一步发展冰晶粒子的探测和反演方法提供良好的理论基础。

参考文献:

- [1] LIOU K N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective [J]. *Monthly Weather Review*, 1986, 114(6): 1167.
- [2] GULTEPE I, HEYMSFIELD A J, GALLAGHER M, et al. Ice Fog: The current state of knowledge and future challenges [J]. *Meteorological Monographs*, 2017, 58(1): 4.1-4.24.
- [3] ZHAO Yanjie, WEI Heli, CHEN Xiuhong, et al. Infrared radiative properties of cirrus clouds in shortwave spectral region [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(9): 1449. (in Chinese)
- [4] YANG P, LIOU K-N, BI L, et al. On the radiative properties of ice clouds: Light scattering, remote sensing, and radiation parameterization [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32: 32-63.
- [5] YANG P, HIOKI S, SAITO M, et al. A review of ice cloud optical property models for passive satellite remote sensing [J]. *Atmosphere*, 2018, 9(12): 499.
- [6] LIU Lei, WENG Chensi, LI Shulei, et al. Review of terahertz passive remote sensing of ice clouds [J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(12): 1211-1221. (in Chinese)
- [7] LIOU K-N. Electromagnetic scattering by arbitrarily oriented ice cylinders [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(3): 667-674.
- [8] WU Jvxiu, DOU Fangli, AN Dawei, et al. Simulation of scattering characteristics of non-spherical ice crystals with 94/220 GHz millimeter-wavelength [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(3): 377-384. (in Chinese)
- [9] GAYET J F, SHCHERBAKOV V, MANNSTEIN H, et al. Microphysical and optical properties of midlatitude cirrus clouds observed in the southern hemisphere during INCA [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A Journal of the Atmospheric Sciences, Applied Meteorology and Physical Oceanography*, 2006, 132(621): 2719-2748.
- [10] LI H, TIIRA J, VON Lerber A, et al. Towards the connection

- between snow microphysics and melting layer: insights from multifrequency and dual-polarization radar observations during BAECC [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(15): 9547-9562.
- [11] WANG Dewang, LIU Liping, ZHONG Linzhi, et al. Analysis of the characters of melting layer of cloud radar data and its identification [J]. *Meteorological Monthly*, 2012, 38(6): 712-721. (in Chinese)
- [12] WU Jvxiu, YANG Lei, DOU Fangli, et al. The detection capability to ice clouds for space-borne terahertz dual-frequency radar [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(6): 718-727. (in Chinese)
- [13] WU Qiong, YANG Meilin, YI Honggang, et al. Retrieval of cloud microphysics parameters from spaceborne 94/220 GHz dual-frequency cloud radar based on non-spherical ice particles [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, 40(5): 605-615. (in Chinese)
- [14] HONG G. Parameterization of scattering and absorption properties of nonspherical ice crystals at microwave frequencies [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D11): D11208.
- [15] KIM M J. Single scattering parameters of randomly oriented snow particles at microwave frequencies [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D14): D14201.
- [16] LIU G. A database of microwave single-scattering properties for nonspherical ice particles [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(10): 1563-1570.
- [17] PURCELL E M, PENNYPACKER C R. Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains [J]. *Astrophysical Journal*, 1973, 186: 705-714.
- [18] DRAINE B T, FLATAU P J. User guide for the discrete dipole approximation code DDSCAT 7.3 [DB/OL]. (2013-05-26) [2025-03-06]. <https://arxiv.org/abs/1305.6497>.
- [19] SEGELSTEIN D J. The complex refractive index of water[D]. Kansas City, Missouri: University of Missouri-Kansas City, 1981.
- [20] WARREN S G, BRANDT R E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: A revised compilation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D14): D14220.

Optical properties of melting ice crystal particles in the terahertz band

ZHANG Xuehai¹, LIU Wenbo¹, LI Yao^{2*}, LI Yiwen², ZHANG Xinhui¹, ZOU Shuguang¹,
LI Weidong¹, ZHAO Yanchuang¹

(1. School of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. National Key Lab of Aerospace Power System and Plasma Technology, School of Aeronautical Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract:

Objective Ice crystal particles form complex mixed-state features during the melting process, which in turn affects their optical and radiative properties, with important implications for studies of global radiation effects and weather forecasting. Early researchers assumed the shape of ice crystal particles as spherical for theoretical studies. Recently, various standard nonspherical particle models such as hexagonal, cylindrical, and bullet have been developed to study the optical properties of ice crystal particles. However, the real ice crystal particle morphology is much more complex than the standard models. For example, the melting process of ice crystal particles is a very common but extremely important process, which is important for the study of microphysical and optical properties of ice crystal particles. During rainfall process, ice crystal particles are transformed into raindrops in the melting layer, and the microphysical properties such as the morphology and mixing state of ice crystal particles undergo a complex change. For the study of the melting process of ice crystal particles, there are advantages and shortcomings in both field observations and radar observations. Therefore, it is important to construct an accurate melting ice crystal particle model to study the optical properties of ice crystal particles during the melting process.

Methods In this paper, a non-spherical non-uniform model is proposed to simulate the morphology and mixing state of ice crystal particles during the melting process, and the Discrete Dipole Approximation (DDA) method is used to systematically study the effect of frequency, aspect ratio, and Ice-to-Water Mixing Ratio (IWMR) on the optical properties of melting ice crystal particles.

Results and Discussions The results show that the optical properties (extinction efficiency factor, scattering efficiency factor, asymmetry factor, and scattering phase matrix) of ice crystal particles at different melting stages have large differences. Specifically, the larger the particle size of melting ice crystal particles, the larger the oscillation amplitude of its extinction efficiency factor, scattering efficiency factor and asymmetry factor with frequency change, and the larger the oscillation of the scattering phase matrix element of melting ice crystal particles, with the increase of frequency. With the melting of the ice crystal particles, these optical parameters show regular changes with the decrease of IWMR, which also implies that ignoring the melting process of the ice crystal particles may lead to misestimation of their optical properties. The results also show that the influence of ice crystal particle morphology on extinction efficiency factor, scattering efficiency factor and asymmetry factor is mainly in the lower melting stage. When the melting degree is low, the aspect ratio of the ice crystal nuclei has a significant effect on all the optical property parameters. When the melting degree is high, the effect of the nuclear aspect ratio on the non-scattering optical parameters such as the particle extinction efficiency, scattering efficiency and asymmetry factor is basically negligible, but with the increase of the particle size, the nuclear aspect ratio of the ice crystals still has a significant effect on the particle scattering matrix elements. The results of the study can provide a reference for further understanding of the evolution law of microphysical properties of ice clouds and improving the accuracy of ice-water content inversion and other studies.

Conclusions This paper presents a parameterized model of melting ice crystals, which is based on the actual scenario of the complex evolution process of particle morphology and mixing state exhibited during the melting process of ice crystal particles. This model has been developed in order to address the practical needs of microwave remote sensing and inversion algorithm research of ice crystal particles. A particle model is constructed and the DDA method is employed to conduct a comprehensive investigation into the influence of various factors, including particle size, frequency, morphology and melting degree, on the optical characteristics of ice crystal particles. These characteristics include extinction efficiency factor, scattering efficiency factor, asymmetry factor and scattering matrix elements.

Key words: ice crystal particles; melting process; light scattering; discrete dipole approximation

Funding projects: National Science and Technology Major Project of China (J2019-V-0008-0102); National Natural Science Foundation of China (42307560); Key Research and Development Project in Henan Province (241111211100); Key Scientific Research Project of Colleges and Universities in Henan Province (25B170004); Key Projects of Science and Technology Research of Henan Province (222102320087)