

粒子取向以及空气含量对卷云雷达 反射率因子的影响分析

王金虎^{1,2}, 葛俊祥^{1,2*}, 祝潇¹, 魏鸣², 杨泽鑫¹, 李家强¹

(1. 南京信息工程大学 江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044;

2. 南京信息工程大学 中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044)

摘要:为研究卷云的非球形粒子对毫米波雷达的散射特性,利用矩量法计算了卷云六种非球形冰晶粒子最大尺寸与散射截面之间的双指数函数关系.利用三种假设模型:Ⅰ. B-H 混合模型、Ⅱ. 等效椭球模型、Ⅲ. 等效球模型分别验证 NASA 在 2007 年 7 月 31 日一次卫星与飞机同步测云试验数据,对比后发现模型Ⅰ(B-H 模型)模拟 4 个位置处实测的结果最好,模型Ⅱ的结果其次,模型Ⅲ的结果最差,但是 B-H 模型模拟 1 号,2 号,3 号位置处的雷达反射率因子与实测值相比偏低,分析原因认为粒子谱探测仪器忽略了滴晶粒子贡献.加入滴晶粒子后统一拟合 1 号,2 号,3 号以及 4 号的普适性粒子谱,拟合其满足 B-H 模型时冰水含量与雷达反射率因子之间的关系式,将 CVI 仪器实测的冰水含量值代入上面的关系式得到反演的雷达反射率因子,对比 CRS 毫米波雷达实测的雷达反射率因子可知:当云中冰水含量小于 0.1342 g/m^3 ,冰晶中的空气含量对雷达反射率因子的影响要远大于粒子的取向问题;当云中冰水含量介于 $0.1342 \sim 0.1994 \text{ g/m}^3$,冰晶中的空气含量可以忽略不计而仅考虑粒子的取向问题;当云中冰水含量大于 0.1994 g/m^3 ,B-H 模型将不再适用.因此为了利用毫米波雷达反射率因子精确地反演云中冰晶粒子,应以冰水含量为前提考虑 B-H 模型中冰晶粒子的取向以及空气含量.

关键词:矩量法;冰晶粒子;雷达反射率因子;空气泡;粒子取向

中图分类号:TN011 **文献标识码:**A

Effect of orientation and air content of ice particles on radar reflectivity factor

WANG Jin-Hu^{1,2}, GE Jun-Xiang^{1,2*}, ZHU Xiao¹, WEI Ming², YANG Ze-Xin¹, LI Jia-Qiang¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, china;

2. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, china)

Abstract: In order to study the scattering properties of non-spherical ice particles which are detected by millimeter-wave radar, the backscattering cross sections of six kinds of non-spherical ice crystals of cirrus were studied. The double-exponential function relationships between particles' maximum sizes and backscattering cross sections is fitted. Three assumed models; I. B-H mixing model, II. Equivalent ellipsoid model, III. Equivalent sphere model, respectively, were used to simulate the data provided by the NASA's synchronous satellite and airplanes experiment for cloud observation on July 31, 2007. The results showed that the data retrieved by B-H mixing model agree very well with the measured results at four positions compared with the results retrieved by other two models. However the retrieved results by B-H mixing model at 1#, 2#, 3# positions are lower than values detected by CRS millimeter

收稿日期:2015-01-12,修回日期:2015-10-24

Received date: 2015-01-12, revised date: 2015-10-24

基金项目:国家自然科学基金(61372066);普通高校研究生科研创新计划(CXLX12_0500);国家科技部公益性(气象)行业专项(GYHY201206038);江苏省双创团队人才计划

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61372066); Graduate Students' Scientific Research Innovation Program of Higher Education Institution of China (CXLX12_0500); National Special Research Fund for Non-Profit Section (meteorological) (GYHY201206038); Jiangsu Innovation & Entrepreneurship Group Talents Plan

作者简介(Biography): 王金虎(1987-),男,江苏南通人,博士研究生,主要从事毫米波雷达系统、粒子散射理论计算与测量以及微波遥感的研究. E-mail: goldtigerwang@nuist.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: jxge@nuist.edu.cn

wave radar. This is because cloud size distribution detector ignores the droxtals which are beyond the detection range. Considering these droxtals and fitting all size distributions at 1#, 2#, 3# and 4#, the common size distribution which meets B-H model can be acquired and the relationship between Ice Water Content (IWC) and Z can be fitted. Putting IWC measured by CVI instrument into above formula (IWC-Z), the retrieved radar reflectivity factors can be acquired, and then compared with the results detected by CRS millimeter wave radar. The results show that the influence of air content on radar reflectivity factor is larger than particle's orientation when IWC is below 0.1342 g/m^3 . The influence of air content can be ignored while the particle's orientation should be considered when the value of IWC is between 0.1342 g/m^3 and 0.1994 g/m^3 . B-H model is not applicable when IWC is larger than 0.1994 g/m^3 . Based on above analysis, the orientation and air content must be considered under the premise of IWC in order to accurately retrieve ice particles using millimeter-wave radar.

Key words: moment method, ice particles, radar reflectivity factor, air bubbles, particle's orientation

PACS: 92.60.Ta

引言

大气高层的卷云一方面反射或散射太阳的短波辐射,另一方面吸收地表和大气发射的长波辐射,因此它在调节大气的能量收支平衡方面起到了关键作用,但在理解和预测全球气候系统变化的研究中,卷云的辐射仍是一个尚不能精确确定的因子^[1].

为了获得卷云的宏微观物理参数,一些主被动仪器被作为云的遥感手段,这些仪器中,毫米波云雷达在探测云的垂直、水平尺度以及内部结构方面具有独特的优势^[2-3].为了更好地利用云的雷达回波分析云的各种宏微观物理特性,需要清楚地知道云粒子与雷达发射电磁波之间的相互作用.目前有多种数值算法被用于计算卷云的非球形粒子散射^[4], Ferdinando Borghese 等人在 94GHz 频率下利用 T 矩阵方法研究了针状、柱状、板状冰晶粒子的雷达散射截面^[5], Min-Jeong Kim 等利用 DDA 方法研究了五种形状的晶体在 94 GHz, 183 GHz 以及 340 GHz 处的单次散射特性,比较了 DDA 与 Mie 计算球形粒子散射以及 DDA 与 FDTD 计算柱状冰晶散射上的差别^[6]. Jani Tyynela 等用 DDA、T 矩阵计算了 Ka (8mm) 波段和 W (3mm) 波段雷达后向散射截面随粒子尺度的变化以及水平垂直偏振波的后向散射截面之比随粒子最大尺度的变化^[7]. Zhang Zhibo 等人在 94 GHz 频率下用 FDTD 法研究形状、大小、取向、粒子尺度比对冰晶后向散射截面的敏感性^[8].但是很少有作者利用数值算法计算卷云粒子群散射特性时同时考虑冰晶粒子的取向以及掺杂空气含量对其散射特性的影响,而 Labonnote^[9], Knap^[10] 等人的研究表明,云中的冰晶在碰撞以及合并的过程中,会有一些空气掺杂其中. Zhibo Zhang^[8], Jin-hu

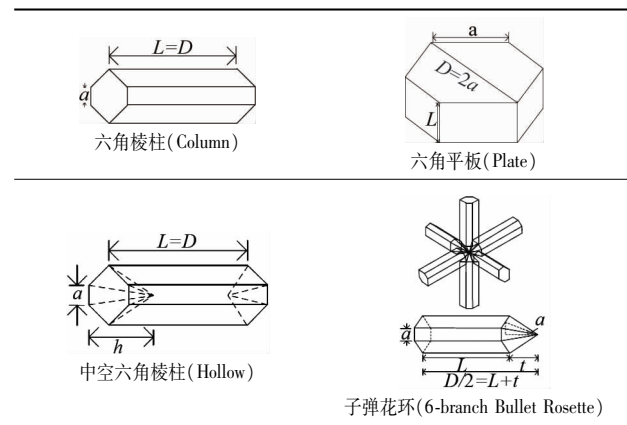
Wang^[11-12] 等人研究了云中粒子的取向对于非球形冰晶粒子单次散射特性计算的影响,认为考虑云粒子的取向问题更符合实际探测.本文利用矩量法研究了非球形粒子在三种不同取向下后向散射截面与粒子最大尺寸之间的关系,利用 Debye 理论研究了掺杂空气的非球形粒子散射.结合实测的粒子谱可计算出三种不同粒子群模型的雷达反射率因子,对比实测结果后认为 B-H 模型反演结果最好,但反演结果偏小,研究该模型在不同取向以及空气含量下雷达反射率因子与冰水含量的关系以更加逼近实测的结果.

1 理论

1.1 冰晶粒子模型的理论研究

冰晶粒子的形状和大小是多种多样的,随高度变化,它取决于温度、相对湿度以及在云中是否经历了碰撞与合并过程^[13].本文在计算卷云粒子散射特性时选用了 Gang Hong 的模型^[14],其模型如表 1 所示:

表 1 卷云冰晶粒子的六种常见形状
Table 1 Six habits of cirrus cloud



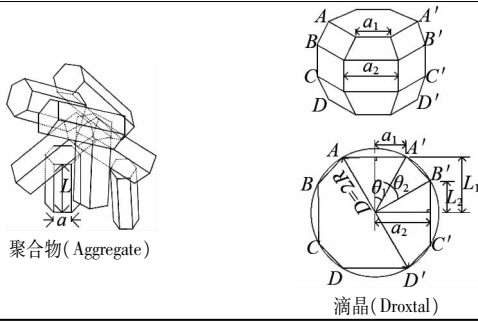


表1中列出了卷云中常见的六种非球形纯冰晶粒子尺寸模型,而现实中云的冰晶在碰撞合并过程中会掺杂一定的空气^[9-10],因此在计算冰与空气均匀混合粒子的后向散射截面时应首先利用 Debye 关系式(即通过 K 因子的体积权重平均)计算其等效介电常数 ε_{eq} ^[15]:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{1 + 2K}{1 - K} \quad (1)$$

其中 K 因子为:

$$K = \frac{K_1 V_1 + K_2 V_2}{V_1 + V_2} = (1 - f)K_1 + fK_2 \quad (2)$$

式(2)中下标 1 和 2 代表两种不同的介质, f 为第 2 种介质的体积占混合物总体积的比例, ($K_i = \frac{(\varepsilon_i - 1)}{(\varepsilon_i + 2)}$) ($i = 1, 2$).

假设空气为第 1 种介质,此时 $K_1 = K_{air} = \frac{\varepsilon_{air} - 1}{\varepsilon_{air} + 2} \approx 0$ ($\varepsilon_{air} = m_{air}^2 \approx 1$),冰晶为第 2 种介质,介电常数选取为 $\varepsilon_{ice} = 3.13 - j0.011$ ^[16],则 $K_2 = K_{ice} = \frac{\varepsilon_{ice} - 1}{\varepsilon_{ice} + 2} = 0.4152 - j0.0013$,故掺杂 $(1 - f)$ 比例的空气后冰晶粒子的等效复介电常数为:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{(1 + 0.8304f) - j0.0026f}{(1 - 0.4152f) + j0.0013f} \quad (3)$$

毫米波雷达实际探测卷云时,风切变或者对流运动将导致雷达有效照射体积内的粒子发生旋转运动,为了模拟实际的探测结果,将运动粒子模型分为随机取向以及水平取向,注意到表 1 中所示粒子的位置定义为固定取向的情况.

前面给出了单个粒子在纯冰晶、掺杂空气以及各种取向(固定取向、水平取向、随机取向)时的理论模型,但是毫米波雷达探测的卷云为冰晶粒子群,因此讨论粒子群模型符合实际的情况.目前在辐射测量中已经有多种粒子群模型被用于冰云的反演中,其中 Baum *et al*^[17]. 根据几次现场实验的机载探针以及探空仪器给出了一种比较通用的粒子群混合

模型,将其定义为模型 I; 椭球状粒子的散射特性被广泛地应用于雷达探测雨滴^[18]、卫星遥感反演沙尘暴^[19]等方面,因此本文将云中各种非球形粒子假设为椭球形状粒子,并将这类粒子群模型定义为模型 II; 在冰云辐射特性的数值研究中,利用非球形粒子进行散射计算时不但计算量大而且计算时间长,所以在冰云辐射特性及参数化的研究中多采用等效球理论^[20-21],本文将这类粒子群模型定义为模型 III, 三种模型的具体定义如下所示:

①模型 I. (B-H 混合粒子群模型): 当粒子的最大直径 $D < 0.06$ mm 时,100% 的滴晶粒子; 当粒子的最大直径 $0.06 < D < 1$ mm 时,15% 的子弹花环,50% 的实体六角棱柱,35% 的平板; 当粒子的最大直径 $1 < D < 2.5$ mm 时,45% 的中空六角棱柱,45% 的实体六角棱柱,10% 的聚合物; 当粒子的最大直径 $D > 2.5$ mm 时,97% 的子弹花环,3% 的聚合物.

②模型 II. (等效椭球粒子群模型) 转换规则: 等效椭球粒子的体积与非球形粒子的体积相等,且椭球粒子长半轴的 2 倍等于非球形粒子的最大尺寸.

③模型 III. (等效球粒子群模型) 转换规则: 以非球形粒子的最大尺寸为等效球形粒子的直径.

1.2 冰晶粒子雷达反射率因子的理论计算

本文利用基于混合积分方程(面积分方程)的矩量法计算卷云冰晶粒子的后向散射截面,其基本原理是利用电磁场的等效原理以及惟一性定理结合 PMCHW 方法得到混合积分方程,然后根据 RWG 基函数对粒子表面的电流源和磁流源进行展开,参照伽略金方法^[22]的基本原理将 RWG 基函数作为权函数对混合积分方程进行加权,计算的结果可写成下面的矩阵形式:

$$\bar{\bar{Z}} \times \bar{\bar{I}} = \bar{\bar{V}} \quad (4)$$

式(4)中, $\bar{\bar{Z}}$ 为阻抗矩阵, $\bar{\bar{I}}$ 为电流和磁流系数, $\bar{\bar{V}}$ 为电场和磁场激励矩阵,矩阵中各元素的具体表达式可参考相关文献^[23].

为了求解电流和磁流系数 $\bar{\bar{I}}$,需要首先求解阻抗矩阵 $\bar{\bar{Z}}$,该矩阵决定了不同边元之间的相互作用,而在处理阻抗矩阵对角线元素时由于场点和源点重合使得格林函数的积分值趋于无穷大,导致阻抗矩阵对角元素出现无穷大的阻抗值,本文采用了质心切分法处理阻抗矩阵的奇异性^[24],在求得阻抗矩阵 $\bar{\bar{Z}}$ 之后利用矩阵的左除运算即可求得电流和磁流系数 $\bar{\bar{I}}$.

通过偶极子模型法可得所有偶极子的辐射场,即分别得到位于原点的无穷小电偶极子以及磁偶极子在某点 r 的矢量辐射场 \bar{H}_e 和 \bar{E}_e 以及 \bar{H}_m 和 \bar{E}_m ^[25],

此时雷达散射截面可表示为:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E^S|^2}{|E^I|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|H^S|^2}{|H^I|^2} \quad (5)$$

其中; $\vec{E}^S = \vec{E}_e + \vec{E}_m$; $\vec{H}^S = \vec{H}_e + \vec{H}_m$

目前雷达气象学^[8]中常用雷达反射率因子来衡量被测气象目标物的散射情况,它与粒子后向散射截面 σ 之间的换算关系如下所示:

$$Z = \frac{\lambda^4}{\pi^5} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^{-2} \sum \sigma \quad (6)$$

式(6)中 λ 为雷达的波长, m 为粒子的复折射指数, $\sum \sigma$ 为单位体积内所有粒子的 RCS 总和.

2 NASA 的一次卫星与飞机同步测云实验

2007 年 7 月 31 日 UTC:1423-1439,美国宇航局 (NASA)进行了卫星 (GOES: Geostationary Operational Environmental Satellite)与飞机 (ER-2 以及 DC-8)同步测云实验,ER2 飞机与 DC8 飞机航线图如图 1 所示^[26]:

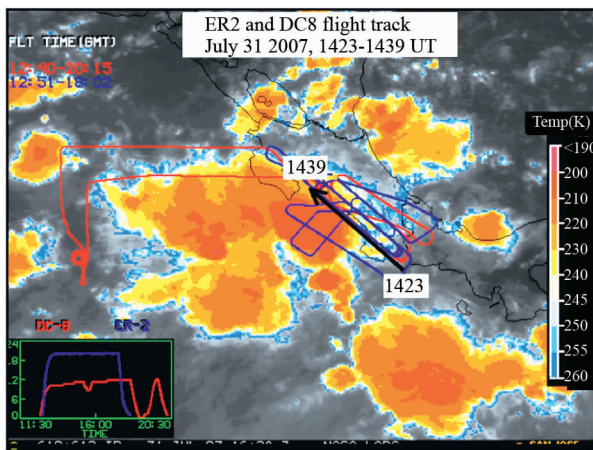


图1 GOES IR 成像图(叠加了 ER-2 飞机(蓝线),DC-8 飞机(红线))
Fig.1 GOES IR imaging map with ER-2 aircraft and DC-8 aircraft tracks superimposed

图1 中蓝线代表 ER-2 飞机飞行的路线,红线代表 DC-8 飞机飞行的路线,黑线代表两架飞机于 2007 年 7 月 31 日 UTC:1423-1439 同步飞行,NASA 的 ER-2 飞机搭载的 94 GHz 云雷达系统 (CRS: Cloud Radar System)在 20 km 高度处观测云的雷达反射率因子^[27]如图 2 所示.

图 2 为 94 GHz 云雷达探测的雷达反射率因子, 11.4 km 高度处的水平黑色实线为 DC-8 飞机飞行的高度,探测时周围的温度大约为-47℃,11.4 km 处 CRS 测量的雷达反射率因子的廓线如图 3 所

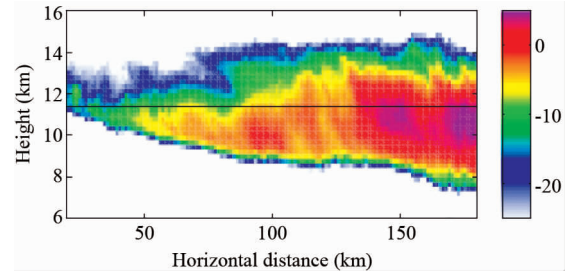


图2 ER-2 飞机搭载的 94 GHz 云雷达系统测量的雷达反射率因子(单位:dBZ)
Fig.2 Radar reflectivity observed by 94GHz cloud radar onboard ER-2 aircraft

示^[27]:

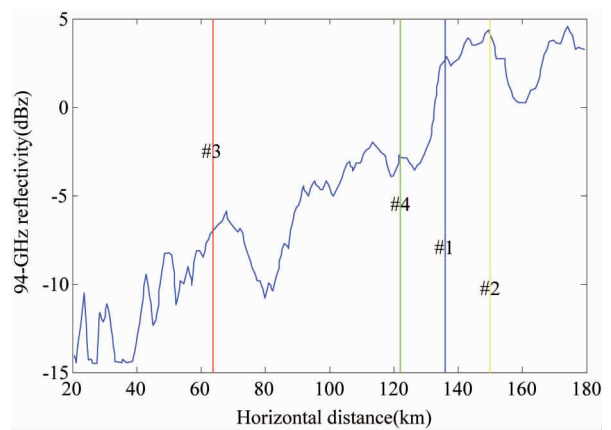


图3 11.4 km 处 CRS 测量的雷达反射率因子廓线
Fig.3 Radar reflectivity factor profile measured by CRS at 11.4 km

11.4 km 高度上 DC-8 飞机上的 CVI (Counter-flow Virtual Impactor) 探头给出的云水含量值^[26]如图 4 所示:

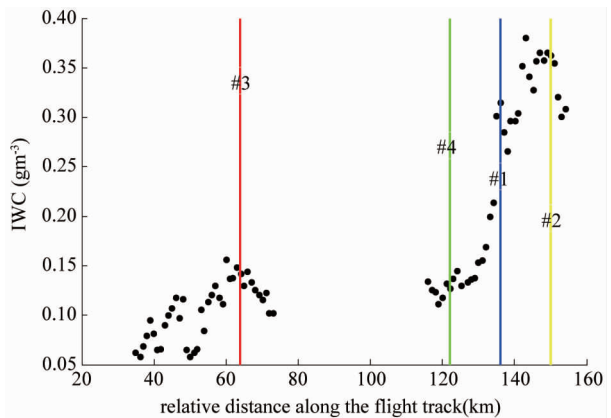


图4 DC-8 携带的 CVI 仪器测量的云冰水含量
Fig.4 Ice water content measured by CVI instrument on DC-8

图 3 以及图 4 中,#1,#2,#3 以及#4 代表了测量

卷云冰晶粒子谱的四个位置,这四个位置处的冰水含量以及雷达反射率因子如表 2 所示.

表 2 四个站点实测的冰水含量以及雷达反射率因子值
Table 2 Ice water content and radar reflectivity factors at four positions

测量的位置	冰水含量值/ $g \cdot m^{-3}$	雷达反射率因子/ $dBz (mm^6 m^{-3})$
#1	0.316 148	2.737 0(1.878)
#2	0.363 813	4.074 6(2.555 4)
#3	0.144 942	-6.973 1(0.200 8)
#4	0.131 323	-2.761 3(0.529 5)

DC8 飞机携带的滴谱仪在 4 个位置处实测的指数粒子谱分布如下所示^[28]:

$$\begin{cases} N_d(D) = 6.292 \times 10^6 \cdot e^{-6.955D} & \#1 \text{ 位置} \\ N_d(D) = 8.425 \times 10^6 \cdot e^{-5.923D} & \#2 \text{ 位置} \\ N_d(D) = 7.17 \times 10^8 \cdot e^{-21.28D} & \#3 \text{ 位置} \\ N_d(D) = 2.18 \times 10^6 \cdot e^{-4.641D} & \#4 \text{ 位置} \end{cases}, \quad (7)$$

其中 D 为粒子的直径(即粒子的最大尺寸), $N_d(D)$ 为粒子的数密度分布函数.

3 理论仿真结果的对比和讨论

利用 Mom 计算表 1 中固定取向的六种非球形冰晶粒子(用于模型 I)、等效椭球粒子(用于模型 II)以及等效球形粒子(用于模型 III)在不考虑空气含量时的后向散射截面 σ (单位: dBm^2)与粒子最大尺寸 D (单位: μm)之间的关系,如下所示:

① 六种非球形冰晶粒子的散射截面与粒子最大尺寸之间的关系:

$$\begin{cases} \sigma_{column} = -108.3e^{-0.01264D} - 99.93e^{-0.000137D} \\ \sigma_{plate} = -113.4e^{-0.009731D} - 102.4e^{-0.0001638D} \\ \sigma_{hollow} = -116.2e^{-0.01272D} - 101.1e^{-0.0001345D} \\ \sigma_{bullet\ rosette} = -43.5e^{-0.00154D} - 86.37e^{-8.434 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{aggregate} = -60.91e^{-0.001636D} - 94.16e^{-7.242 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{droxtal} = -111.6e^{-0.01001D} - 88.44e^{-0.0001755D} \end{cases}, \quad (8)$$

② 六种非球形冰晶粒子等效成椭球粒子的散射截面与粒子最大尺寸之间的关系:

$$\begin{cases} \sigma_{column_ellipsoid} = -118.9e^{-0.01264D} - 100.3e^{-0.0001374D} \\ \sigma_{plate_ellipsoid} = -112.5e^{-0.01106D} - 103.2e^{-0.0001628D} \\ \sigma_{hollow_ellipsoid} = -124.7e^{-0.0131D} - 101.6e^{-0.0001342D} \\ \sigma_{bullet\ rosette_ellipsoid} = -94.6e^{-0.003587D} - 85.94e^{-9.894 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{aggregate_ellipsoid} = -74.22e^{-0.003218D} - 105e^{-0.0001371D} \\ \sigma_{droxtal_ellipsoid} = -110e^{-0.01042D} - 85.47e^{-0.0001943D} \end{cases}, \quad (9)$$

③ 六种非球形冰晶粒子等效成球形粒子的散射截面与粒子最大尺寸之间的关系:

$$\sigma_{equivalent_sphere} = -108.9e^{-0.007561D} - 79.94e^{-0.0001561D}, \quad (10)$$

将公式(8)、(9)、(10)分别结合公式(7)所示的粒子谱可得 4 个位置处模型 I (B-H 混合粒子群模型)、模型 II (等效椭球粒子群模型)以及模型 III (等效球粒子群模型)的雷达反射率因子,对比实测结果如表 3 所示.

表 3 3 种模型计算的雷达反射率因子与实测结果对比(单位 $mm^6 \cdot m^{-3}$, 括号内数据的单位 dBz)

Table 3 Comparison between the measured results and three assumed models

测量的位置	实测雷达反射率因子	模型 I	模型 II	模型 III
#1	1.878 (2.737)	0.558 9 (-2.527)	0.583 7 (-2.338 2)	31.281 9 (14.952 9)
#2	2.555 4 (4.074 6)	1.329 3 (1.236 2)	1.420 5 (1.524 5)	81.497 7 (19.111 5)
#3	0.200 8 (-6.973 1)	0.121 3 (-9.162 1)	0.116 1 (-9.350 0)	4.441 8 (6.475 6)
#4	0.529 5 (-2.761 3)	0.797 5 (-0.982 9)	0.886 1 (-0.525 4)	53.895 9 (17.315 6)

表 3 表明模型 I 在 1#,2#,3#,4#位置处的相对误差分别为-70.24%,-47.98%,-39.59%,50.61%,模型 II 在这些位置处的相对误差分别为-68.73%,-44.41%,-42.18%,67.35%,模型 III 在这些位置处的相对误差分别为 1565.7%,3089.23%,2112.05%,10078.64%,综合各个位置处的反演结果以及现场采集的云粒子形状图像^[29]可知使用模型 I 最能够代表实际卷云中的粒子模型.注意到在 1 号、2 号、3 号位置处,模型 I 和模型 II 的反演结果均偏小,说明模型的假设中忽略了某些重要的物理因子,查看此次试验中粒子谱测量仪器手册发现该仪器的最小可探测粒子尺寸为 $50\mu m$,故云中小于该尺寸的滴晶粒子将被忽略,而这部分的粒子却被毫米波雷达所探测,这是利用实测的粒子谱反演的雷达反射率因子比毫米波雷达实测的结果偏小的一个重要因素.为了使研究的问题具有普遍意义,本文将这四个位置处的粒子谱进行统一拟合,得到此次试验中考虑滴晶粒子后单位体积内普适性的粒子谱函数:

$$N_d(D) = 4.955 \times 10^6 e^{-5.511D}, \quad (11)$$

其中 $N_d(D)$ 为粒子的数密度分布函数, D 为粒子的最大尺寸.

将 B-H 混合模型结合公式(8)、(11)可计算不

考虑空气含量的固定取向 B-H 模型雷达反射率因子与冰水含量值的关系:

$$Z = 2.121e^{1.426 * IWC} - 10.99e^{-6.938 * IWC} \quad (12)$$

将图 4 实测的冰水含量值代入公式(12),反演得到不考虑空气含量的固定取向 B-H 模型的雷达反射率因子值,将其与实测的雷达反射率因子对比如图 5 所示:

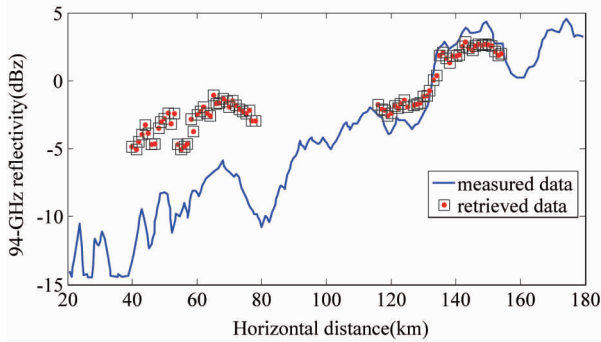


图 5 固定取向的 B-H 模型反演的雷达反射率因子与实测结果的对比

Fig. 5 Comparison between retrieved data by fixed B-H model and the measured data

图 5 中红色的点代表固定取向 B-H 模型反演的雷达反射率因子值,蓝色的实线代表 CRS 雷达实测的反射率因子,结果表明冰水含量小于 0.1994 g/m^3 时固定取向 B-H 模型反演的雷达反射率因子高于 CRS 雷达实测的结果,而冰水含量大于 0.1994 g/m^3 时固定取向 B-H 模型反演的结果比实际值小,因此我们需要对假设的模型做进一步的研究,文献^[8,11-12]表明雷达在探测卷云冰晶粒子时应该考虑粒子的取向问题,故对于冰水含量小于 0.1994 g/m^3 的卷云,将粒子的取向加入到 B-H 模型中;对于冰水含量大于 0.1994 g/m^3 的卷云,由于其冰水含量较大,实际中卷云大冰晶粒子的个数要多于 B-H 模型的假设,即粒子间的碰并效应作进一步的考虑,有些大冰晶粒子可能会超过 6.2 mm (滴谱仪最大可探测的尺度)而不被粒子谱仪器探测到,注意到本文重点在于考虑 B-H 模型下粒子的取向以及空气含量问题对于雷达反射率因子的影响,所以对于冰水含量超过 0.1994 g/m^3 的卷云冰晶粒子本文不予考虑。

对于冰水含量小于 0.1994 g/m^3 的卷云冰晶粒子,本文分别拟合出不考虑空气含量的 B-H 混合模型在水平取向以及随机取向雷达后向散射截面 $\sigma (\text{dBm}^2)$ 与粒子最大尺寸 $D (\mu\text{m})$ 的关系式,如下所示。

① 水平取向:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{column}} = -110.2e^{-0.01292D} - 101.5e^{-0.0001308D} \\ \sigma_{\text{plate}} = -113.8e^{-0.01159D} - 104e^{-0.0001689D} \\ \sigma_{\text{hollow}} = -79.44e^{-0.007124D} - 98.95e^{-0.0001169D} \\ \sigma_{\text{bullet rosette}} = -69.82e^{-0.003228D} - 92.63e^{-9.829 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{\text{aggregate}} = -63.08e^{-0.002008D} - 98.48e^{-8.308 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{\text{droxtal}} = -113.2e^{-0.009981D} - 90.31e^{-0.0001678D} \end{cases} \quad (13)$$

② 随机取向:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{column}} = -74.94e^{-0.006116D} - 96.57e^{-0.0001065D} \\ \sigma_{\text{plate}} = -84.54e^{-0.007245D} - 100.3e^{-0.0001479D} \\ \sigma_{\text{hollow}} = -83.92e^{-0.006959D} - 98.63e^{-0.0001069D} \\ \sigma_{\text{bullet rosette}} = -72.07e^{-0.003134D} - 91.97e^{-9.215 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{\text{aggregate}} = -62.23e^{-0.001843D} - 95.48e^{-7.882 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{\text{droxtal}} = -87.66e^{-0.005344D} - 80.52e^{-0.0011393D} \end{cases} \quad (14)$$

根据 B-H 混合模型的定义以及公式(11)、(13)、(14)可以分别计算出不考虑空气含量时水平以及随机取向该模型的雷达反射率因子与冰水含量值的关系,如下所示:

① 水平取向:

$$Z = 1.051e^{2.262 * IWC} - 12.44e^{-7.94 * IWC} \quad (15)$$

② 随机取向:

$$Z = 0.6398e^{2.81 * IWC} - 12.38e^{-7.807 * IWC} \quad (16)$$

将图 4 实测的冰水含量值分别代入公式(15)、(16)可反演出不考虑空气含量时水平以及随机取向 B-H 模型的雷达反射率因子值,将其与实测的雷达反射率因子对比如图 6 所示。

图 6 中黑色的点代表水平取向 B-H 模型反演

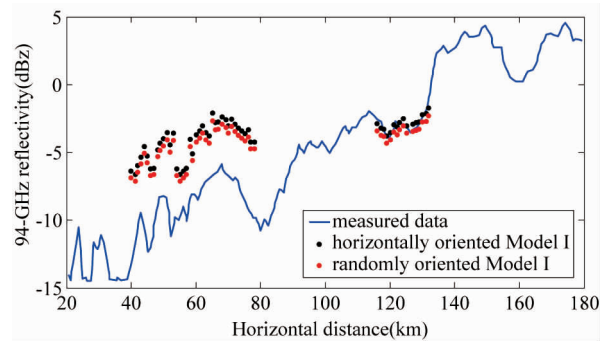


图 6 水平取向以及随机取向的 B-H 模型反演的雷达反射率因子与实测结果的对比

Fig. 6 Comparison amongst retrieved data by horizontally and randomly oriented B-H models and the measured data

的雷达反射率因子值,红色的点代表随机取向 B-H 模型反演的雷达反射率因子值,蓝色实线代表 CRS 毫米波雷达实测的雷达反射率因子值,结果表明水平取向的 B-H 模型在水平距离 115 ~ 133 km 处反演的结果比随机取向的 B-H 模型反演的结果更接近于实测值,而在 35 ~ 73 km 处,水平以及随机取向 B-H 模型反演的结果均大于实测的结果,随机取向的结果比水平取向的结果更接近实测值.因此在 35 ~ 73 km 处,本文在随机取向 B-H 模型的基础上进一步考虑其它物理因素,使反演的结果更接近于实测值.

Labonnote^[9], Knap^[10]等人的研究表明,云中的冰晶在碰撞以及合并的过程中,会有一部分的空气掺杂其中;Valery Shcherbakov 等人^[30]利用射线追踪技术仿真实测卷云冰晶的角散射强度后认为冰晶内存在着大量的空气泡.因此本文在随机取向 B-H 模型基础上作进一步的假设,考虑冰晶粒子的空气含量分别为 10%、20%、30%、40% 时对水平距离 35 ~ 73 km 处的卷云散射特性反演的影响,首先由公式 (3) 计算出这几种空气含量下冰晶的等效复介电常数分别为 2.789 9 ~ 0.009 9i (10% 空气含量)、2.492 1 ~ 0.007 0i (20% 空气含量)、2.229 2 ~ 0.005 4i (30% 空气含量)、1.995 3 ~ 0.004 2i (40% 空气含量),然后拟合出不同空气含量下随机取向 B-H 混合模型的雷达后向散射截面 σ (dBm²) 与粒子最大尺寸 D (μm) 的关系式,如下所示.

① 10% 空气含量:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{column}} = -115.3e^{-0.01357D} - 102.7e^{-0.0001279D} \\ \sigma_{\text{plate}} = -106.2e^{-0.0118D} - 106.7e^{-0.0001628D} \\ \sigma_{\text{hollow}} = -80.51e^{-0.007205D} - 100.1e^{-0.0001137D} \\ \sigma_{\text{bullet rosette}} = -87e^{-0.004404D} - 95.92e^{-0.0001013D} \\ \sigma_{\text{aggregate}} = -68.15e^{-0.002518D} - 103.7e^{-9.16 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{\text{droxtal}} = -109.9e^{-0.008939D} - 87.24e^{-0.0001588D} \end{cases}, \quad (17)$$

② 20% 空气含量:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{column}} = -83.49e^{-0.006921D} - 98.98e^{-0.0001093D} \\ \sigma_{\text{plate}} = -79.88e^{-0.005225D} - 101.6e^{-0.0001301D} \\ \sigma_{\text{hollow}} = -47.82e^{-0.002484D} - 91.52e^{-8.133 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{\text{bullet rosette}} = -41.19e^{-0.001092D} - 83.42e^{-6.883 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{\text{aggregate}} = -70.13e^{-0.002519D} - 101e^{-7.916 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{\text{droxtal}} = -92.26e^{-0.005059D} - 79.91e^{-0.0001146D} \end{cases}, \quad (18)$$

③ 30% 空气含量:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{column}} = -91.61e^{-0.007682D} - 101.3e^{-0.0001037D} \\ \sigma_{\text{plate}} = -88.5e^{-0.005923D} - 102.4e^{-0.0001324D} \\ \sigma_{\text{hollow}} = -47.81e^{-0.002332D} - 92.25e^{-7.617 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{\text{bullet rosette}} = -40.46e^{-0.001104D} - 85.29e^{-6.823 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{\text{aggregate}} = -72.24e^{-0.002399D} - 102e^{-7.638 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{\text{droxtal}} = -90.9e^{-0.004892D} - 80.47e^{-0.000108D} \end{cases}, \quad (19)$$

④ 40% 空气含量:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{column}} = -86.55e^{-0.00737D} - 102.7e^{-0.0001005D} \\ \sigma_{\text{plate}} = -85.68e^{-0.006101D} - 106.4e^{-0.0001268D} \\ \sigma_{\text{hollow}} = -47.32e^{-0.002409D} - 94.08e^{-7.489 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{\text{bullet rosette}} = -77e^{-0.000987D} - 61.01e^{-1.109 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{\text{aggregate}} = -65.89e^{-0.001594D} - 96.17e^{-5.867 \times 10^{-5}D} \\ \sigma_{\text{droxtal}} = -93.15e^{-0.005116D} - 82.2e^{-0.0001092D} \end{cases}. \quad (20)$$

根据 B-H 混合模型的定义以及公式 (11)、(17)、(18)、(19)、(20) 可得不同空气含量下该模型的雷达反射率因子 Z 与冰水含量值 IWC 的关系,如下所示:

① 10% 空气含量:

$$Z = 0.5404e^{2.811 * IWC} - 12.94e^{-7.569 * IWC}, \quad (21)$$

② 20% 空气含量

$$Z = 0.1278e^{4.628 * IWC} - 13.36e^{-6.963 * IWC}, \quad (22)$$

③ 30% 空气含量:

$$Z = 2.24 \times 10^{-5}e^{16.1 * IWC} - 14.73e^{-5.357 * IWC}, \quad (23)$$

④ 40% 空气含量:

$$Z = -7.423e^{-27.79 * IWC} - 12.36e^{-3.371 * IWC}. \quad (24)$$

将图 4 实测的冰水含量值分别代入公式 (21)、(22)、(23)、(24) 可反演出不同空气含量下随机取向 B-H 模型的雷达反射率因子值,将其与实测的雷达反射率因子对比如图 7 所示:

图 7 中青色、绿色、红色以及黑色的数据点分别代表 10%、20%、30%、40% 空气下随机取向 B-H 模型反演的雷达反射率因子值,蓝色实线代表 CRS 毫米波雷达实测的雷达反射率因子值,对比结果可知空气含量为 30% 的随机取向 B-H 模型在水平距离 35 ~ 73 km 处拟合的雷达反射率因子与实测值最接近.

综上所述,水平距离为 35 ~ 73 km 的卷云可近似为空气含量 30% 的随机取向 B-H 模型,水平距离 115 ~ 133 km 的卷云可近似为水平取向 B-H 模型,将本文拟合的结果同 Atlas (1954)^[31]、Brown (1995)^[32]、Aydin (1997)^[33]、Liu (2000)^[34]、Matrosov (2008)^[35] 拟合的数据对比如图 8 所示:

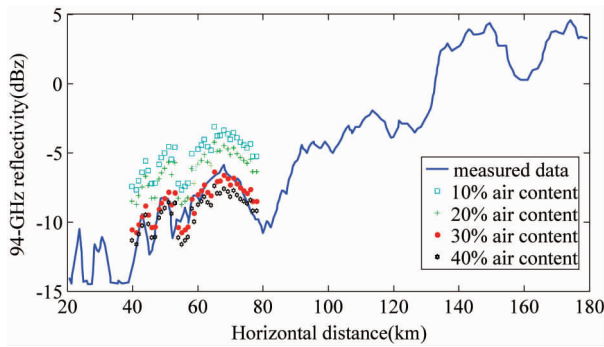


图7 不同空气含量的随机取向模型 I 反演的结果与实测雷达反射率因子的对比

Fig. 7 Comparison amongst randomly oriented B-H models with different air contents and the measured data

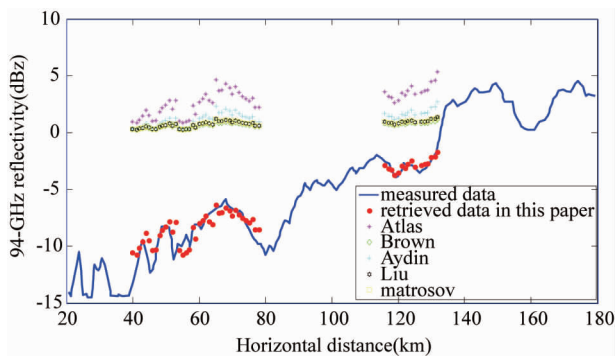


图8 不同作者反演雷达反射率因子值与实测雷达反射率因子的对比

Fig. 8 Comparison amongst retrieved data by different authors' formulas and the retrieved data in this paper and the measured data

图8 中品红、绿色、青色、黑色以及黄色的数据点分别代表 Atlas (1954)、Brown (1995)、Aydin (1997)、Liu (2000) 以及 Matrosov (2008) 的反演结果,红色的数据点为模型反演的结果,蓝色实线代表 CRS 毫米波雷达实测的雷达反射率因子值,反演的结果表明在 35 ~ 73 km 处以及 115 ~ 133 km 处分别采用 30% 空气含量的随机取向 B-H 模型和不含空气的水平取向 B-H 模型反演的雷达反射率因子最接近 CRS 毫米波雷达实测的结果,对比图 8 的结果可知本文在考虑空气含量以及粒子取向后的 B-H 模型反演的结果要远好于国外这些作者反演的结果,原因在于这些作者的公式均是针对特定情况,而本文则是在通用 B-H 模型的基础上通过理论分析综合考虑了粒子取向以及粒子掺杂的空气问题。

4 结论

利用矩量法研究了非球形冰晶粒子三种取向下的

的后向散射特性,将固定取向下的结果结合三种粒子群模型分别验证分析了 NASA 2007 年的一次实际探测结果,对比后认为 B-H 混合模型的反演结果精度最高,但是 B-H 模型在 1 号,2 号以及 3 号位置处反演的雷达反射率因子值与实际值相比偏低,在加入滴谱仪未探测到的滴晶粒子后根据 1 号,2 号,3 号以及 4 号位置处实测的粒子谱拟合出普适性粒子谱分布,将该粒子谱结合固定取向 B-H 模型、水平取向 B-H 模型、随机取向 B-H 模型以及不同空气含量随机取向的 B-H 模型反演得到的雷达反射率因子与 CRS 毫米波雷达实测的结果对比,结果表明水平取向 B-H 模型适合于水平距离 115 ~ 133 km 处卷云冰晶粒子的反演,而水平距离 35 ~ 73 km 处卷云使用空气含量为 30% 的随机取向 B-H 模型时反演结果最好,因此考虑粒子的空间取向以及空气含量对于真实地反映云中冰晶粒子的散射情况具有重要的意义。

致谢:

感谢美国 NASA Radiation Sciences Program 提供的数据。

References

- [1] ZHANG Lin. Study on the radiative transmission and scattering properties of cirrus clouds [D]. *Xi'an: Xidian University* (张琳. 卷云的辐射传输与散射特性研究. 西安: 西安电子科技大学), 2010: 1-2.
- [2] ZHONG Ling-Zhi, LIU Li-Ping, GE Run-Sheng, *et al.* A study of the calibration of the new generation of millimeter-wavelength cloud radar (HMBQ) and its detection capability [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (仲凌志, 刘黎平, 葛润生, 等. 毫米波测云雷达的系统定标和探测能力研究. *气象学报*), 2011, **69**(2): 352-362.
- [3] YAN Wei, REN Jian-Qi, LU Wen, *et al.* Cloud phase discrimination technology based on spaceborne millimeter wave radar and lidar data [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (严卫, 任建奇, 陆文, 等. 联合星载毫米波雷达和激光雷达资料的云相态识别技术. *红外与毫米波学报*), 2011, **30**(1): 68-73.
- [4] WANG Jin-Hu, GE Jun-Xiang, WEI Ming, *et al.* Research progresses on theoretical computation and experimental measurement of scattering properties of ice particles [J]. *Computing technology and Automation* (王金虎, 葛俊祥, 魏鸣, 等. 卷云冰晶粒子散射特性的理论计算与实验测量研究进展. *计算技术与自动化*), 2013, **32**(3): 128-131.
- [5] Ferdinando Borghese, Paolo Denti, Rosalba Saija. Scattering from Model Nonspherical Particles: Theory And Applications to Environmental Physics [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2007, **89**(39): 283-297.
- [6] Min-Jeong Kim, Weinman J A, Sun W. Computation of electromagnetic characteristics of frozen hydrometeors at millimeter-wave frequencies [C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'04. Proceedings, IEEE International*,

- 2004, **5**:3555 – 3558.
- [7] Jani Tynnela, Jussi Leinonen, Dmitri Moiseev, *et al.* Radar backscattering from snowflakes: comparison of fractal, aggregate, and soft spheroid models [J]. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 2011, **28**(11): 1366 – 1372.
- [8] Zhang Zhi-bo. Computation of the scattering properties of nonspherical ice crystals [D]. *Texas: Texas A&M University*, 2004: 57 – 78.
- [9] Labonnote L. C., Buriez J. C., Doutriaux-Boucher M., *et al.* Polarized light scattering by inhomogeneous hexagonal monocrystals: validation with ADEOS-POLDER measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D11): 12139 – 12153.
- [10] Knap W. H., C-Labonnote L., Brogniez G., *et al.* Modeling total and polarized reflectances of ice clouds: evaluation by means of POLDER and ATSR-2 measurements [J]. *Applied optics*, 2005, **44**(19): 4060 – 4073.
- [11] WANG Jin-Hu, GE Jun-Xiang, WEI Ming. Theoretical study on single-scattering properties of ice particles of different Orientation at 94 GHz [J]. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2014, **36**: 39 – 46.
- [12] WANG Jin-Hu, GE Jun-Xiang, WEI Ming. The Influence of aspect ratio and orientation to scattering properties of ellipsoid ice particles [J]. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2014, **12**(11): 7543 – 7548.
- [13] Gallagher M. W., Whiteway J., Flynn M. J., *et al.* An overview of the microphysical structure of cirrus clouds observed during EMERALD-1 [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2004, **131**: 1143 – 1169.
- [14] Gang Hong. Parameterization of scattering and absorption properties of nonspherical ice crystals at microwave frequencies [J]. *Journal of Geophysical research*. 2007, **112**: D11208.
- [15] Debye P. J. W. *Polar molecules* [M]. New York: Dover, 1929: 30 – 50.
- [16] Aydin K., Walsh T. M. Millimeter wave scattering from spatial and planar bullet rosettes [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*. 1999, **37**(2): 1138 – 1150.
- [17] Baum B. A., Heymsfield A. J., YANG P., *et al.* Bulk scattering properties for the remote sensing of ice clouds. Part I: microphysical data and models [J]. *J. Appl. Meteorol.* 2005, **44**: 1885 – 1895.
- [18] ZHANG Pei-Chang, HU Fang-Chao, WANG Zhen-Hui. A study on meteorological equations for dual-polarization radar detecting small ellipsoids [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (张培昌, 胡方超, 王振会. 双线偏振雷达探测小椭圆粒子群的雷达气象方程. *热带气象学报*), 2013, **29**(2): 505 – 510.
- [19] SUN Xian-Ming, WANG Hai-Hua, LIU Wang-Qiang, *et al.* Nonspherical model for sand dust storm and its application to the research of light multiple scattering [J]. *Acta Optica Sinica* (孙贤明, 王海华, 刘万强, 等. 沙尘暴粒子的非球形模型及其对激光的多次散射特性研究. *光学学报*), 2010, **30**(5): 1506 – 1509.
- [20] WANG Jin-Hu, GE Jun-Xiang, WEI Ming, *et al.* Error analysis of equivalent sphere theory for calculating the scattering properties of ice crystals at millimeter wavelength [J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)* (王金虎, 葛俊祥, 魏鸣, 等. 2014. 等效球理论计算冰晶粒子毫米波散射的误差分析. *河南师范大学学报(自然科学版)*), 2014, **42**(5): 40 – 44.
- [21] WANG Zhen-Hui, TENG Xu, JI Lei, *et al.* A study of the relationship between the attenuation coefficient and radar reflectivity factor for spherical particles in clouds at millimeter wavelengths [J]. *Acta Meteorological Sinica* (王振会, 滕煦, 纪雷, 等. 球形粒子毫米波 K-Z 关系研究. *气象学报*), 2011, **69**(6): 1020 – 1028.
- [22] NIE Zai-ping, FANG Da-gang. Electromagnetic scattering characteristics of target and modeling, theory, method and implementation (elementary) [M]. Beijing: National Defence Industry Press (聂在平, 方大纲. 目标与环境电磁散射特性建模—理论、方法与实现(基础篇). 北京: 国防工业出版社), 2009: 82 – 88.
- [23] NIE Zai-Ping, FANG Da-Gang. *Electromagnetic scattering characteristics of target and modeling, theory, method and implementation (advanced)* [M]. Beijing: National Defence Industry Press (聂在平, 方大纲. 目标与环境电磁散射特性建模—理论、方法与实现(应用篇). 北京: 国防工业出版社), 2009: 51 – 56.
- [24] Makarov S. *Antenna and EM modeling with MATLAB* [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002: 1 – 20.
- [25] Kraus J. D., Fleisch D. A. *Electromagnetics* [M]. New York: McGraw-Hill, 1984: 5 – 20.
- [26] Tian L., Heymsfield G. M., Heymsfield A. J., *et al.* A study of cirrus ice particle size distribution using TC4 observations [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, **67**(1): 195 – 216.
- [27] Hogan R. J., TIAN L., Brown P. R. A., *et al.* Radar scattering from ice aggregates using the horizontally aligned oblate spheroid approximation [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, **51**(3): 655 – 671.
- [28] Baumgardner D., Jonsson H., Dawson W., *et al.* The cloud, aerosol and precipitation spectrometer?: A new instrument for cloud investigations [J]. *Atmos. Res.* 2001, **59-60**: 251 – 264.
- [29] Baran A. J. A review of the light scattering properties of cirrus [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. , 2009, **110**: 1239 – 1260.
- [30] Shcherbakov V., Gayet J. F., Jourdan O., *et al.* Light scattering by single ice crystals of cirrus clouds [J]. *Geophys. Res. Lett.* 2006, **33**: L15809.
- [31] Atlas D. The estimation of cloud parameters by radar [J]. *J. Meteor.* 1954, **11**: 309 – 317.
- [32] Brown P. R. A., Illingworth A. J., Heymsfield A. J., *et al.* The role of spaceborne millimeter-wave radar in the global monitoring of ice-cloud [J]. *Appl. Meteorol.* 1995, **34**: 2346 – 2366.
- [33] Aydin K., TANG C. Relationships between IWC and polarimetric radar measurands at 94 GHz and 220 GHz for hexagonal columns and plates [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.* , 1997, **14**: 1055 – 1063.
- [34] Liu C. L., Illingworth A. J. Measuring crystal size in cirrus using 35 and 94 GHz radars [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.* , 2000, **17**(1): 27 – 37.
- [35] Matrosov S. Y., Heymsfield A. J. Estimating ice content and extinction in precipitating cloud systems from CloudSat radar measurements [J]. *J. Geophys. Res.* , 2008, **113**: D00A05.