

吴举秀,魏鸣,黄磊,等.对非球形冰晶 94 GHz 云雷达后向散射和衰减的研究.气象科学,2016,36(1):63-70.

WU Juxiu, WEI Ming, HUANG Lei, et al. Back scattering and attenuation of non-spherical ice crystals with 94 GHz millimeter-wave-length. Journal of the Meteorological Sciences, 2016, 36(1): 63-70. doi:10.3969/2015jms.0002

对非球形冰晶 94 GHz 云雷达后向散射和衰减的研究

吴举秀¹ 魏鸣² 黄磊¹ 涂爱琴¹ 刘彬¹

(1 山东省气象局大气探测技术保障中心, 济南 250031; 2 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京信息工程大学, 南京 210044)

摘要 针对 94 GHz 毫米波云雷达的数据处理, 基于离散偶极子近似法 (DDA) 计算了几种非球形冰晶的后向散射及衰减效率, 探讨了不同冰晶模型下冰晶的雷达反射率因子 (Z_e) 和衰减系数 (k) 及冰水含量 (IWC, 记作 W) 的关系。结果表明: (1) 形状对冰晶的散射及衰减效率与粒子大小有关。(2) 在实际的冰云中, 将六角形冰晶和椭圆冰晶看做同体积的球形粒子将低估其衰减和后向散射。将聚合物冰晶看做等体积球形, 将高估其后向散射及衰减, 子弹花冰晶的后向散射与同体积的球形相比有减小也有增大, 但是衰减比同体积球形的小。(3) 冰晶模型对 Z_e - k 、 Z_e - W 关系具有较大影响, 假设滴谱相同的条件下, 得到了具体冰晶模型下对应 Z_e - k 、 Z_e - W 关系的系数。这些探讨为我国 W 波段云雷达的数据处理提供了参考。

关键词 94 GHz 云雷达; 非球形冰晶; 散射特性; 衰减系数

分类号 P412.25

doi: 10.3969/2015jms.0002

文献标识码: A

Back scattering and attenuation of non-spherical ice crystals with 94 GHz millimeter-wavelength

WU Juxiu¹ WEI Ming² HUANG Lei¹ TU Aiqin¹ LIU Bin¹

(1 Ensuring Center of Atmospheric Sounding Technology, Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031, China;

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract Aiming at 94 GHz millimeter-wavelength cloud radar, the back scattering and attenuation of non-spherical ice crystals with a variety of shapes are analyzed by DDA algorithm, moreover, the relationship between radar reflectivity factor (Z_e), attenuation coefficient (k) and Ice Water Content (W) is revealed. Results show that: (1) the effects of ice particles types on back scattering and attenuation of ice particles depend on their sizes. (2) In the actual ice clouds, treating the hexagonal or ellipsoidal ice crystals as the same volume spherical particles would underestimate its attenuation and back scattering, however, treating aggregations as the same spherical volume would overestimate the scattering and attenuation. The back scattering of bullet flower crystals, compared with the spherical volume, may decrease or increase, but the attenuation is certain to be smaller than the spherical particles. (3) Ice models have great effects on Z_e - k , Z_e - W relations. The relationships between attenuation coefficient and radar reflectivity factor are derived based on refined models for the ice hydrometeors in the case of same particle size

收稿日期 (Received): 2014-09-17; 修改稿日期 (Revised): 2014-12-31; 网络出版日期 (Published on-line): 2016-01-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1243.P.20160119.0954.002.html>

基金项目: 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201206038, GYHY201306040, GYHY201406033); 江苏省高校自然科学重大基础研究项目 (10KJA170030); 灾害天气国家重点实验室开放课题 (2010LASW-A01); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2012466); 北极阁基金 (BJG201208, BJG201102); 山东省气象局面上课题 (2015sdqxm13); 国家自然科学基金资助项目 (41305031); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

通信作者 (Corresponding author): 魏鸣 (WEI Ming). njueducn@126.com

distributions. The results help process Chinese W band cloud radars data.

Key words 94 GHz cloud radar; Non-spherical particles; Scattering characteristics; Attenuation coefficient

引言

近年来发展起来的毫米波云雷达对非降水云及弱降水云的探测表现出很大的优势^[1-5]。常用的毫米波雷达波长为 3 mm(W 波段,频率约为 94 GHz)及 8 mm(Ka 波段,频率约为 35 GHz),与 35 GHz 雷达相比,94 GHz 雷达由于波长较小,因此探测粒子后向散射的能力较强^[6]。1980s 后期美国开始将 94 GHz 雷达应用于云物理和降水物理研究项目中^[7-8]。美、英、德、日本等国家先后研制出 94 GHz 云雷达,21 世纪后云雷达得到了迅速发展,并于 2006 年在 CloudSat 卫星成功搭载了 94 GHz 云廓线雷达^[9-10]。目前,我国正在大力发展 94 GHz 云雷达,为云雷达上卫星积极准备着^[11]。

雷达回波信号依赖于粒子谱和云的后向散射及衰减特性。由于云雨和大气的衰减作用,必须对探测的回波进行衰减订正,衰减系数取决于衰减截面和粒子谱。在遥感探测研究中,云的散射特性一般采用等效球 Mei 理论,冰云及混合相云中包含多种形状的冰晶粒子,粒子衰减包含粒子的散射和吸收两个方面。将冰晶粒子看做米散射球或椭球,无法实现精确的雷达反演^[12-18]。LIU^[12]研究了冰晶和雪晶的微波单散射特性,Botta, et al^[13]认为描述冰晶形状的冰云模型必须详细化。Leinonen, et al^[14]认为当雷达波长和粒子在同一数量级时,冰晶的椭球形近似不能准确描述冰粒子的后向散射特性。Petty, et al^[15]认为用 Rayleigh-Gans 理论计算聚合物冰晶及软冰球散射和衰减时将出现很大错误。HONG^[16]通过研究发现,利用等效球表征冰晶大小时,雷达后向散射截面与利用的等效方法有关,这些等效方法包括等体积法、等投影面积法、等体积与投影面积的比的方法。在雷达波束垂直指向时,将粒子等效为球形或椭球形在用毫米波雷达测量毫米量级的粒子时将低估雷达反射率因子^[17-18]。根据实测数据,Tyynelä, et al^[19]发现将较大的雪花等效为球形,其后向散射截面在 Ka 波段将低估 10 倍。冰云模型是复杂的,探讨不同冰云模型下,由非球形冰晶组成冰云的雷达反射率因子及衰减系数,对毫米波雷达的应用将非常有意义。

本文主要基于离散偶极子近似法(DDA),计算

了不同形状冰晶的后向散射截面及衰减截面,并与同体积球形的进行了比较。并在假设冰晶滴谱一样的条件下,分析了不同冰云模型的雷达反射率因子及衰减系数,建立了基于详细冰云模型的雷达反射率因子(Z_e)与冰水含量(IWC,记作 W)、雷达反射率因子与衰减系数(k)的具体关系式。

1 基本理论

目前计算非球形粒子散射特性的算法主要有离散偶极子近似法(DDA)、时域有限差分法(FDTD)、T 矩阵法(T Matrix)^[20]、改进的几何光学法(IGOM)和反常衍射理论(ADT)等。其中,DDA 方法很适合用来研究非球形粒子的散射和吸收特性^[21]。其主要原理是用有限个离散的、相互作用的小偶极子的阵列来近似实际的粒子,从而对实际粒子散射的研究转化为对这些小立方体内的小偶极子散射的研究。本文主要采用 DDA 法计算非球形冰晶粒子的散射截面和衰减截面。

对于直径远小于波长的小球形冰晶粒子,雷达回波强度可用瑞利散射计算^[6]:

$$Z = \int_0^{D_{\max}} N(D) D^6 dD, \quad (1)$$

其中 $D_{\max}$ 是最大粒子的直径, D 为粒子直径, $N(D)$ 是粒子谱。

对于大球形及非球形冰晶粒子,如果用 $\sigma(D)$ 表示最大尺度为 D 的大球形或非球形粒子的后向散射截面,则等效雷达反射率因子可表示为^[6]:

$$Z_e = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K_i|^2} \int_0^{D_{\max}} N(D) \sigma(D) dD, \quad (2)$$

其中, λ 是雷达波长, $D_{\max}$ 是最大粒子的最大尺度, D 为粒子的最大尺度。 $\sigma(D)$ 为后向散射截面, $K_i = (m_i^2 - 1)/(m_i^2 + 2)$, m_i 是冰晶的复折射指数, $\lambda = 3.2$ mm 时, $|K_i|^2 = 0.1796$ 。由于云雨的衰减,要对回波强度进行衰减订正,衰减系数定义为^[6]:

$$k = \int_0^{D_{\max}} N(D) Q_{\text{ext}}(D) dD, \quad (3)$$

此处衰减系数 k 的单位为 km^{-1} , $N(D)$ 是冰晶谱, $Q_{\text{ext}}(D) = Q_a(D) + Q_s(D)$ 是衰减截面, $Q_a(D)$ 、 $Q_s(D)$ 分别是吸收和散射截面。在瑞利散射条件下^[22]:

$$Q_{\text{ext}}(D) = (\pi^2 D^3 \text{Im}(-K))/\lambda, \quad (4)$$

其中, $\text{Im}(-K)$ 是取 $-K$ 的虚部。取冰的密度为 $0.917 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 则衰减系数 ($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$) 为^[6]:

$$k = \frac{8.18 \text{Im}(-K)}{0.917\lambda} W, \quad (5)$$

其中, λ 的单位为 cm , W 为冰水含量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。可以看出, 一定波长时, 衰减系数只和冰水含量有关。当温度 263 K , 频率为 94 GHz 时, $m = 1.7831 + 0.00075i$ ^[23], $\text{Im}(-K)$ 则为 7.9761×10^{-4} 。大量的机载探测结果表明, 中纬度冰晶云滴谱一般为 Gamma 形式^[24]:

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\beta D), \quad (6)$$

其中, N_0 是滴谱的浓度, β 为斜率, D 为粒子最大尺度, μ 是冰晶谱的形状参数。参数 N_0, β 可由实测的冰水含量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 及粒子谱的中值尺度 (the median maximum dimension of the distribution, D_m , cm) 确定。

2 冰晶粒子后向散射和衰减的模拟计算

云中冰晶粒子形状多样, 冰云模型也是比较复杂的。根据飞机探测和雷达测量, Hogan, et al^[17] 将冰晶粒子近似为轴比 (短轴比长轴) 为 0.6 的扁椭球。Baum, et al^[18] 利用中纬度冰云的实测数据, 获得一个详细的冰云模型: $D < 60 \mu\text{m}$, 100% 滴晶; $60 < D < 1000 \mu\text{m}$, 15% 子弹花, 50% 六棱柱, 35% 六角平板; $1000 < D < 2000 \mu\text{m}$, 45% 中空六棱柱, 45% 六棱柱, 10% 聚合物; $D > 2000 \mu\text{m}$, 97% 子弹花, 3% 聚合物。 D 指粒子的最大尺度。基于飞机观测, Fu^[25] 发现粒子的长度 L 和宽度 H 具有如下关系:

$$\frac{H}{L} = \begin{cases} 1.00 & 0 < L \leq 30 \mu\text{m} \\ 0.80 & 30 < L \leq 80 \mu\text{m} \\ 0.50 & 0 < L \leq 200 \mu\text{m} \\ 0.34 & 200 < L \leq 500 \mu\text{m} \\ 0.22 & L > 500 \mu\text{m} \end{cases} \quad (7)$$

上式中, 如果六角形冰晶为板状, 则冰晶的长度 L 指六角形边长的两倍, 宽度指两个六角形之间的距离; 如果六角形冰晶为柱状, 则冰晶的长度 L 指两个六角形之间的距离, 宽度指六角形边长的两倍。

假设云中的冰晶粒子为随机取向, 用 x 表示六角形冰晶的宽度与长度之比或者椭球冰晶的轴比 (短轴与长轴之比), 雷达发射水平偏振波, 波长取 3.2 mm , 利用 DDA 方法分别计算轴比为 0.6 的扁椭球冰晶、长宽比为 0.16 和 0.6 的板状冰晶, 及宽度/长度符合公式 1 的柱状及板状冰晶的后向散射效率及衰减效率。计算结果见图 1, 横坐标 $\alpha = 2\pi r_e/\lambda$, 是尺度参数。可以看出, 在粒子等体积等效直径约小于 1 mm 时 (后向散射基本符合瑞利散射,

衰减符合瑞利散射的条件还是等效直径约小于 0.132 mm 时), 所有形状的粒子后向散射效率随粒子增大而增大, 等效直径约大于 1 mm 时, 随粒子的增大出现震荡。在相同等效直径时, 后向散射效率和形状有关。衰减效率基本上是随着粒子等效直径增大而增大, 在等效直径约大于 2.2 mm 时, $x=0.6$ 的椭圆和 $x=0.6$ 的板状冰晶出现振荡现象。

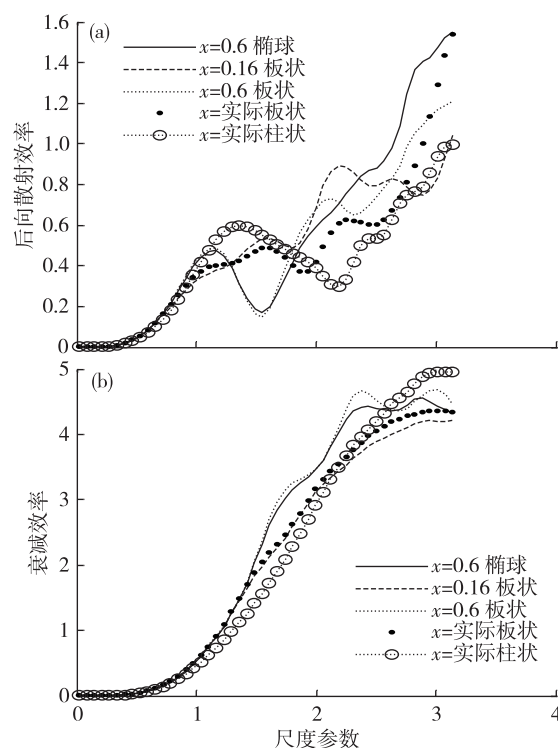


图 1 几种形状冰晶的后向散射效率 (a) 及衰减效率 (b)
Fig.1 The back scattering efficiency (a) and attenuation efficiency (b) of ice crystals of several kinds of shapes

将上面提到的几种不同形状的冰晶与等体积球形冰晶的后向散射和衰减相比较。令 $f_b = Q_{b,NS}/Q_{b,S}$, 即非球形粒子的后向散射截面与球形粒子的后向散射截面之比; 令 $f_t = Q_{t,NS}/Q_{t,S}$, 即非球形粒子的衰减截面与球形粒子的衰减截面之比。其中下标 NS 指非球形, S 指球形, 比较结果见图 2。可以看出, 粒子等效直径约小于 1 mm 时, 非球形对随机取向冰晶的后向散射影响较小, 使衰减增加, 最大使 $x=0.16$ 的板状冰晶增加超过 80%; 在粒子等效直径约大于 1 mm 时, f_b 和 f_t 随尺度参数震荡变化, 非球形使后向散射及衰减有增加有减小。在等效直径约为 1.5 时 (此时球形冰晶具有第一个极小值), 非球形使后向散射增加最大, 其中使 $x=\text{real}$ 的冰晶增加约 6 倍多。在中纬度冰云中, 六角形冰晶最大值一般不超过 2 mm ^[24], 当六角形冰晶最大值为 2 mm 时, 根据等式 (1), 板状冰晶等效直径约为 1.3 mm , 柱状冰晶等效直径约为 0.8 mm , 因此非球

形基本上使 $x = \text{real}$ 的六角形冰晶后向散射和衰减增加,衰减增幅约为 0~50%,后向散射增幅约为 0~30%,增幅都较小。当冰晶最大尺度的最大值为 2 mm 时, $x = 0.6$ 板状冰晶和 $x = 0.6$ 椭圆冰晶的等效直径在 1 mm 内,非球形使 $x = 0.6$ 的椭圆冰晶和板状冰晶的衰减和散射基本都为增加。

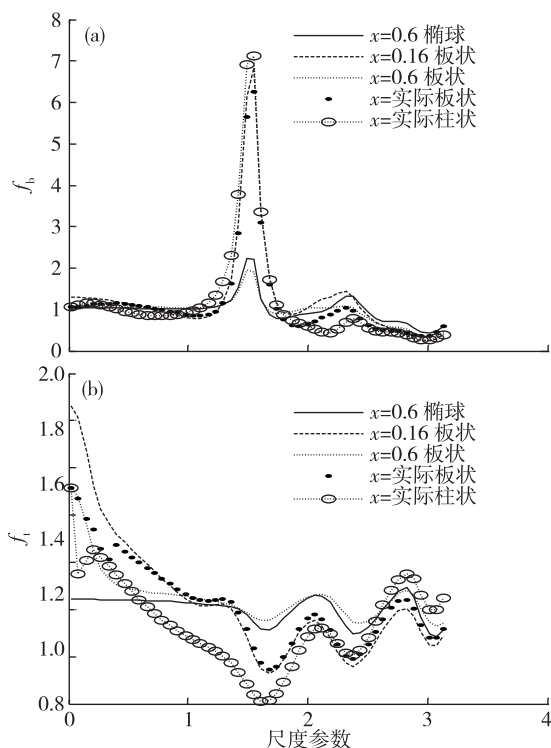


图2 非球形冰晶后向散射(a)和衰减(b)与同体积球形冰晶的比较
Fig.2 Comparing back scattering (a) and attenuation (b) of the non-spherical ice crystals with the same volume spherical ice crystals

图3指聚合物、子弹花的后向散射和衰减与同体积球形冰晶的比较。聚合物、子弹花的后向散射和衰减来自散射特性数据库,密度随 D 增大而减小,聚合物和子弹花随机取向,最大尺度分别为 1.2 cm 及 1.0 cm。可以看出等效半径 $r_e < 0.3$ mm (聚合物、子弹花对应最大尺度 D 分别约 1.5、2 mm) 时,聚合物和子弹花的后向散射效率和球形近似一致,但是衰减比球形的大;等效半径 $r_e > 0.3$ mm 时,聚合物和子弹花的衰减比球形的分别小 1 倍多及两倍多,聚合物后向散射效率也比球形的小,子弹花的后向散射效率在 $0.3 \text{ mm} < r_e < 0.6 \text{ mm}$ ($D = 4.5 \text{ mm}$) 时比球形的小, $0.6 \text{ mm} < r_e < 1.4 \text{ mm}$ ($D = 12 \text{ mm}$) 时比球形的大,在 $r_e = 0.8 \text{ mm}$ ($D = 6.5 \text{ mm}$) 时达到最大,接近 10 倍。根据 Baum, et al^[24],冰云中聚合物最大尺度大于 1 mm,子弹花大于 2 mm,所以此情况下,在等效半径相同时,聚合物的后向散射及衰减比同体积的球形小,而且后向散射减小的多;

子弹花的后向散射与同体积的球形相比较有减小也有增大,但是衰减比同体积球形的小。

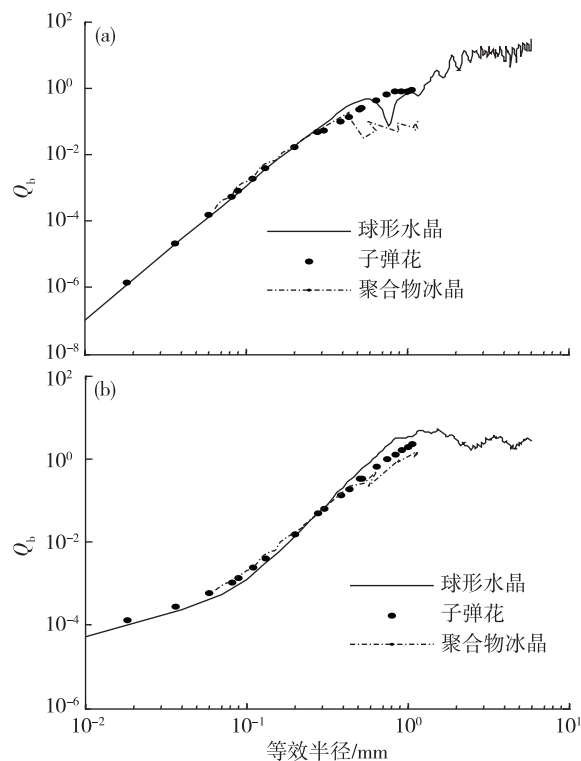


图3 聚合物、子弹花的后向散射(a)和衰减(b)与同体积球形冰晶的比较

Fig.3 Comparing back scattering and attenuation of the aggregates and the bullets flower with the same volume spherical ice crystals

3 冰云的衰减和后向散射

冰云模型的复杂性是反演云参数不确定性的主要来源之一,文中选择 Baum, et al^[26]发展的冰云模型,将模型中的空心六棱柱看做实心六棱柱,因为空心六棱柱和实心六棱柱的散射和衰减差别很小^[16],在研究 $k-Z_e$ 关系中忽略不计;六棱柱及板状的长宽比利用式子(7)确定。滴谱符合公式(6),取滴谱参数 $\mu = 0$, N_0 和 β 的值根据云中冰晶粒子中值尺度 D_m (单位:cm) 和冰水含量 W ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 的范围由下式(8)(9)^[26]获得:

$$D_m = \frac{2.97 + \mu}{\beta}, \quad (8)$$

$$W = \frac{6590 N_0 \Gamma(3.3 + \mu)}{\beta^{(3.3 + \mu)}} \quad (9)$$

其中 N_0 、 β 、 μ 由上式(6)定义, D_m 是滴谱的中值尺度。当粒子为球形, D_m 指粒子谱的中值直径。

根据文献[26],中值直径和冰水含量取值范围分别为: $0.01 \leq D_m \leq 0.1$ (cm), $10^{-4} \leq W \leq 10^{-1}$ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),在上述范围内按照正态分布 $D_m: N(0.05, 0.024^2)$ 和 $W: n(0.05, 0.024^2)$ 模拟取样 1 330 (代表 1 330

种冰晶谱分布)次,代入式(2)、(3) 采用线性插值的方法,计算每种情况下的 k 、 Z_e 的值,然后按照幂函数关系式,统计回归得到 $W=aZ_e^b$ 、 $k=aZ_e^b$ 的系数 a 、 b ,及表示统计相关性的相关系数 R 。正态分布 $D_m:N(0.05, 0.024^2)$ 和 $W:N(0.05, 0.024^2)$ 括号中的第一个参数指服从正态分布的随机变量 D_m 和 W 的均值,第二个参数是此随机变量的方差。得到 W - Z_e 、 k - Z_e 、 k - W 关系如图 4 所示。可见,在冰水含量小于 $0.1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,冰云雷达反射率因子在 $-30\sim 10 \text{ dBz}$ 之间,根据毫米波雷达大量的实测,一般非降水冰云的 Z 在 $-30\sim 10 \text{ dBz}$ 之内^[10],所以计算结果是比较合理的。衰减在 $10^{-2} \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 之内,比瑞利散射时的计算值(公式 5)增加了,这是因为在 1 330 种粒子谱中,有些粒子较大,衰减处于米散射区,而且柱状冰晶也具有较大的衰减。 W - Z_e 、 k - Z_e 关系的相关系数分别大于 0.65 和 0.96,所以 k - Z_e 关系的相关程度极高,而 W - Z_e 关系的相关程度显著。此时:

$$W(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})=0.1156 Z_e^{0.4225}(\text{mm}^6\cdot\text{m}^{-3}), \quad (10)$$

$$k(\text{dB}\cdot\text{km}^{-1})=0.0029 Z_e^{0.8718}(\text{mm}^6\cdot\text{m}^{-3}). \quad (11)$$

同时得到的冰水含量和衰减系数的关系(相关系数 $R=0.7276$)如下所示:

$$k(\text{dB}\cdot\text{km}^{-1})=0.0080 W^{1.0058}(\text{g}\cdot\text{m}^{-3}). \quad (12)$$

因此,经过统计回归后,式(12)的系数和瑞利散射条件下的式(5)的系数基本一致的,这说明在 Baum 模型下,冰云的衰减基本可看做和冰水含量成正比。

假设冰云滴谱是一样的,下面探讨一下不同冰云模型时的衰减和后向散射情况。假定冰云中冰晶只有一种形状,分别为球形、轴比为 0.6 的椭球形、长宽比符合公式(1)的柱状或板状、聚合物、子弹花,它们的滴谱都符合公式(6),此时的球形冰晶是指以冰晶最大尺度为直径的球形,同样取 $\mu=0$ 。利用上面提到的方法进行统计回归,得到 k - Z_e 关系如图 5 所示,各种模型对应的 k - Z_e 关系系数 a 、 b 及相关系数 R 也列在表 1 中。此时得到 W - Z_e 关系的相关系数较小,没有实际应用价值。因此只应用了 k - Z_e 关系。

由图 5 可以看出,将冰晶看做以最大尺度为直径的球体,计算的雷达反射率因子近 30 dBz ,远远超过 10 dBz ,明显偏大。将冰晶看做轴比为 0.6 的扁椭球实冰晶, Z 约在 -20 到 20 dBz 之间, Z 值还是较大的。柱状、板状、聚合物、及子弹花的冰云模型,对应 Z 值在 $-40\sim 10 \text{ dBz}$ 之间,比较符合实际探测球值范围的。还可以看出,球形及扁椭球性的冰云模

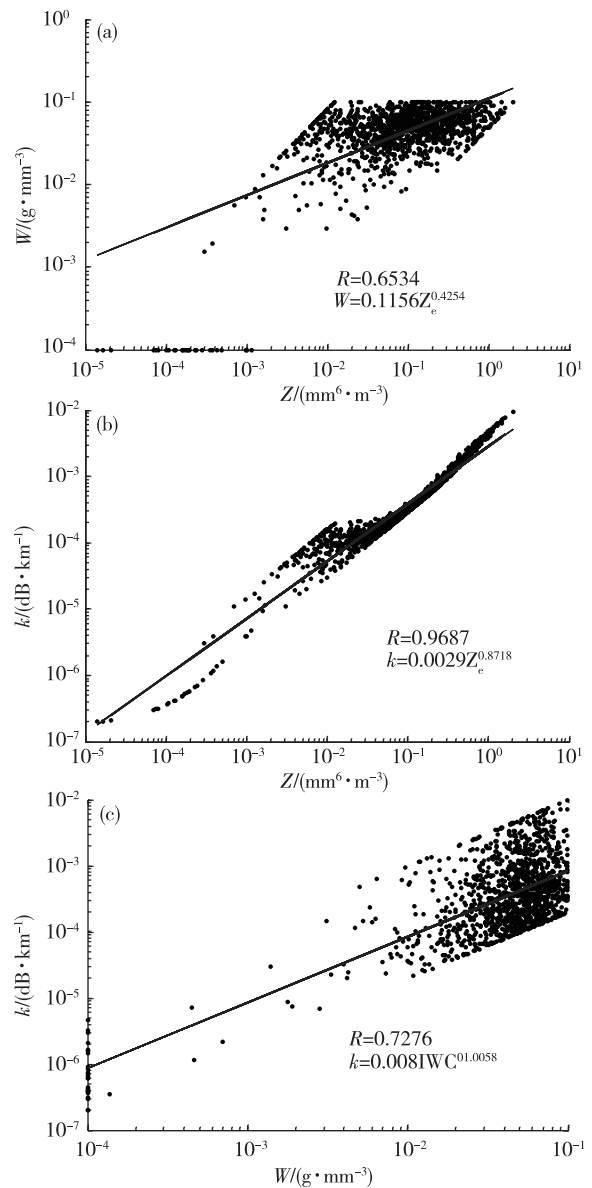


图 4 Baum 模型对应的 W - Z_e (a)、 k - Z_e (b)、 k - W (c) 关系

Fig.4 $C-Z_e$ (a), $k-Z_e$ (b) and k -IWC(c) relationships in the case of Baum model

表 1 各种模型对应 k - Z_e 关系的系数 a 、 b 及相关系数 R

Table 1 The coefficients a and b of k - Z_e relations and correlation coefficient R of ice models

冰云模型	球形	椭球形	柱状	板状	聚合物	子弹花	Baum 模型
a	0.002 7	0.002 9	0.001 1	0.001 9	0.002 9	0.002 9	0.002 9
b	1.094 5	0.925 2	0.686 2	0.730 0	0.919 4	0.919 4	0.871 8
R	0.988 5	0.986 0	0.949 3	0.963 8	0.996 5	0.969 6	0.968 7

型对应的衰减也较大,最高达到了 $1 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 左右,其他一般在 10^{-6} 到 $10^{-2} \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 之间,柱状的最小,最大值小于 $10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 。由表 1 看出 Z 、 k 的相关性都较高。

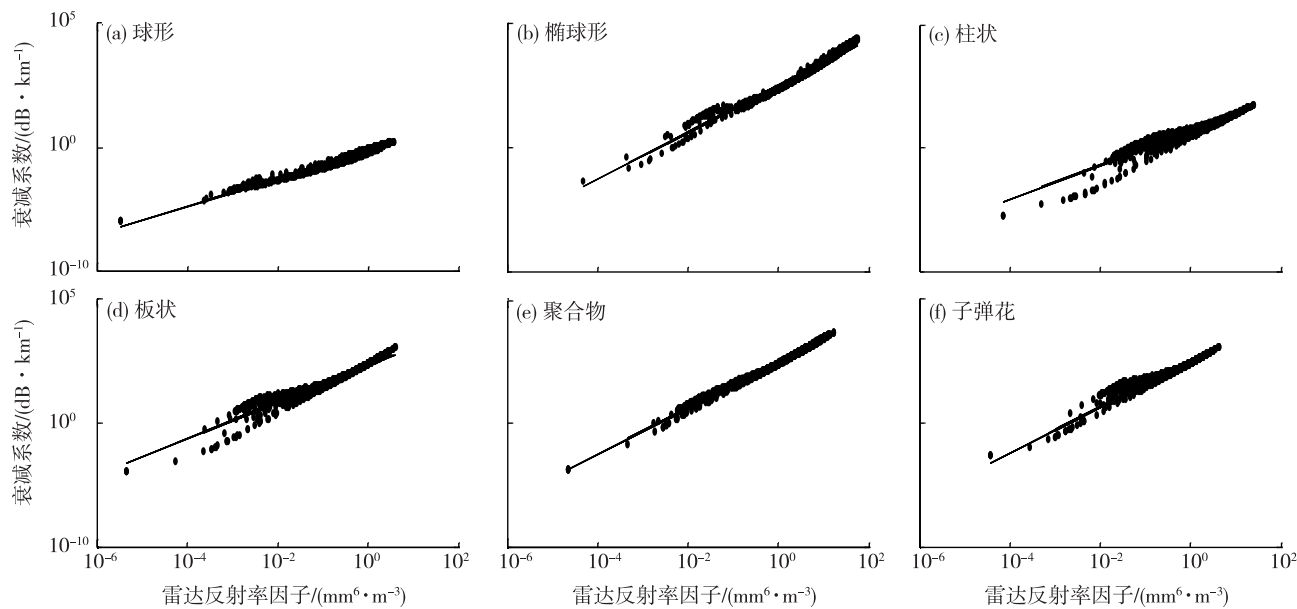


图 5 不同冰云模型对应的 $k-Z_e$ 关系
Fig.5 $k-Z_e$ relationships in the case of several ice cloud models

各种模型对应 $k-Z_e$ 关系的系数 a 、 b 及相关系数 R 见表 1。可以看出,冰云模型对 $k-Z_e$ 关系影响较大。在相同 Z 时,柱状模型对应的衰减最小, Baum 模型对应的衰减都是较大的。

4 冰水含量个例反演

表 2 列出了 94 GHz 云雷达反演云内 W 的经验公式^[18,27-30]。

安徽四创研制的 94 GHz 云雷达在 2013 年 9 月 10 日 11:45—11:53 观测到的雷达反射率因子(图略),此时云层较薄,回波强度为 -15~0 dB_Z。由于

表 2 94 GHz 云雷达反演云中 W 的经验公式

Table 2 The empirical formula for retrieving W using 94 GHz cloud radar		
作者	粒子分布	公式
Atlas(1995)	冰晶云,无降水	$W=0.064Z_e^{0.58}$
Brown(1995)	冰晶云,无降水	$W=0.153Z_e^{0.74}$
Aydin(1997)	模式设定的粒子分布	$W=0.104Z_e^{0.483}$
Liu(2000)	冰晶云,无降水	$W=0.137Z_e^{0.643}$
Matrosov(2001)	多和结果的平均	$W=0.11Z_e^{0.83}$
Matrosov(2008)	降水,冰晶云	$W=0.086Z_e^{0.92}$
本文	设定粒子分布,无降水	$W=0.1156Z_e^{0.4225}$

冰晶云带来的衰减较小,衰减订正也是一项很复杂的工作,所以文中对所测回波没有进行衰减订正。基于 Baum 模型对应的 $W-Z_e$ 关系式及其他文献的关系式进行反演,得到 11:50 时的冰水含量垂直廓

线,如图 6 所示。

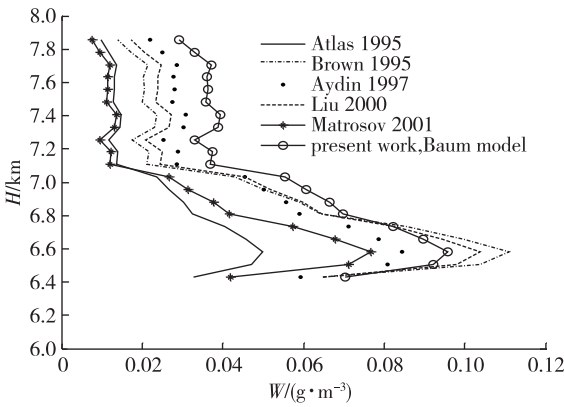


图 6 不同的关系式反演得到的冰水含量的垂直廓线
Fig.6 The vertical profile of ice water content using the different relations

图 6 说明不同关系式反演的结果相差较大,最大值分别处于 0.05 到 0.12 之间,最大相差两倍多, Atlas, et al^[27] 反演的最大值最小, Brown, et al^[28] 反演的最大值最大, LIU, et al^[29] 的次之, 其它的结果在此之间。本文公式反演的结果基本上处在一个平均值的状态,和 Aydin, et al^[30] 最为接近,但当高度超过 6.8 km 时,本文公式反演的结果具有最大值。所有反演结果都在 0.01 到 0.12 之间,都比较符合卷云冰水含量的统计结果^[26]。

5 结论

针对 94 GHz 云雷达在云物理研究中的应用,利用 DDA 算法,分析了几种形状的非球形冰晶在随机取向时的后向散射效率与衰减效率,比较了其与等

体积球形冰晶后向散射和衰减的差别,探讨了不同冰云模型下,冰云后向散射和衰减及冰水含量的关系,分析表明:

(1)在等体积等效直径相同的情况下,不同形状的冰晶具有不同的后向散射效率及衰减效率。与同体积的球形相比,对于六角形和椭圆冰晶,等效直径约小于 1 mm 时,非球形对随机取向冰晶的后向散射影响较小,使衰减增加,最大使 $x=0.16$ 的板状冰晶增加超过 80%;在粒子等效直径约大于 1 mm 时, f_b 和 f_i 随尺度参数震荡变化,非球形使后向散射及衰减有增加有减小。在等效直径约为 1.5 mm 时,非球形使后向散射增加最大。在中纬度冰云中,非球形基本上使椭圆冰晶和六角形冰晶的衰减和后向散射增加,增幅都较小。

(2)对于聚合物和子弹花:聚合物、子弹花对应最大尺度分别小于约 1.5、2 mm 时,聚合物和子弹花的后向散射效率和球形近似一致,但是衰减比球形的大,当大于约 1.5、2 mm 时,聚合物和子弹花的衰减比球形的分别小 1 倍多及两倍多。聚合物后向散射效率也比球形的小,最大可小约 10 倍。最大尺度大于约 5 mm 时,子弹花的后向散射效率比球形的大。

(3)假设冰晶谱为伽马分布,冰晶滴谱一样的条件下,分析不同冰云模型的雷达反射率因子及衰减系数,建立了基于详细冰云模型的 $Z-W$ 及 $Z-k$ 的具体关系式,反演了雷达实测个例的 W 含量。

(4)不同的粒子谱具有不同的回波强度及衰减系数,冰云的散射特性和冰云模型关系很大,冰云模型又是很复杂的。文中谱参数的确定主要利用统计的关系式,关系式和粒子最大尺度有关,因此在滴谱相同的条件下,获得的球形粒子是以最大尺度为直径的球形,无法获得等体积的球形或者其他方式的等效球形。

致谢:非常感谢 Draine 教授提供 DDA 代码。

参 考 文 献

- [1] Kropfli R A, Matrosov S Y, Uttal T, et al. Cloud physics studies with 8mm wavelength radar. *Atmos. Res.*, 1995, 35(2-4): 299-313.
- [2] 仲凌志, 刘黎平, 葛润生. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望. *地球科学进展*, 2009, 24(4): 383-391.
ZHONG Lingzhi, LIU Liping, GE Runsheng. Characteristics about the millimeter-wavelength radar and its status and prospect in and abroad. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 2009, 24(4): 383-391.
- [3] 王德旺, 黄宁立, 谢潇, 等. 35 GHz 云雷达反射率因子数据的质量控制. *气象科学*, 2014, 34(5): 508-514.
WANG Dewang, HUANG Ningli, XIE Xiao, et al. Quality control on reflectivity factor data of 35 GHz-cloud radar. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 2014, 34(5): 508-514.
- [4] 宗蓉, 刘黎平, 银燕. 基于飞机观测资料的降水粒子反射率因子阈值分析. *大气科学学报*, 2014, 37(4): 469-475.
ZONG Rong, LIU Liping, YIN Yan. Analysis of drizzle reflectivity threshold using in-situ measurements. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2014, 37(4): 469-475.
- [5] 樊雅文, 黄兴友, 李锋. 毫米波雷达测云个例研究. *大气科学学报*, 2013, 36(5): 554-559.
FAN Yawen, HUANG Xingyou, LI Feng. A case study on cloud measurement with a 35 GHz millimeter-wave cloud radar. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2013, 36(5): 554-559.
- [6] Lhermitte R M. Centimeter & millimeter wavelength radars in meteorology. Miami, Florida: Lhermitte Publications, 2002: 238-496.
- [7] Lhermitte R M. Observation of rain at vertical incidence with a 94 GHz Doppler radar: an insight on Mie scattering. *Geophys. Res. Lett.*, 1988, 15(10): 1125-1128.
- [8] Lhermitte R M. Attenuation and scattering of millimeter wavelength radiation by clouds and precipitation. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1990, 7(3): 464-479.
- [9] Hogan R J, Illingworth A J, Sauvageot H. Measuring crystal size in cirrus using 35- and 94-GHz radars. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2000, 17(1): 27-37.
- [10] 吴举秀, 魏鸣, 周杰. 94 GHz 毫米波云雷达回波及测云能力分析. *气象学报*, 2014, 72(2): 402-416.
WU Juxiu, WEI Ming, ZHOU Jie. Echo and capability analysis of 94 GHz cloud radars. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 2014, 72(2): 402-416.
- [11] WU Juxiu, WEI Ming, HANG Xin, et al. The first observed cloud echoes and microphysical parameter retrievals by China's 94-GHz cloud radar. *J. Meteor. Res.*, 2014, 28(3): 430-443. doi: 10.1007/s13351-014-3083-x.
- [12] LIU Guosheng. A database of microwave single-scattering properties for nonspherical ice particles. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2008, 89(10): 1563-1570.
- [13] Botta G, Aydin K, Verlinde J, et al. Millimeter wave scattering from ice crystals and their aggregates: Comparing cloud model simulations with X band Ka band radar measurements. *J. Geophys. Res.*, 2011, 116(D1): D00T04. doi: 10.1029/2011JD015909.
- [14] Leinonen J, Kneifel S, Moisseev D, et al. Evidence of nonspheroidal behavior in millimeter-wavelength radar observations of snowfall. *J. Geophys. Res.*, 2012, 117(D18): D18205. doi: 10.1029/2012JD017680.
- [15] Petty G W, HUANG Wei. Microwave backscatter and extinction by soft ice spheres and complex snow aggregates. *J. Atmos. Sci.*, 2010, 67(3): 769-787.
- [16] HONG Gang. Radar backscattering properties of nonspherical ice crystals at 94 GHz. *J. Geophys. Res.: Atmos. (1984-2012)*, 2007, 112(D22). doi: 10.1029/2007JD008839.

- [17] Hogan R J, TIAN Lin, Brown P R A, et al. Radar scattering from ice aggregates using the horizontally aligned oblate spheroid approximation. *J. Appl. Meteor. Climat. Mag.*, 2012, 51(3): 655-671.
- [18] Matrosov S Y, Heymsfield A J. Estimating ice content and extinction in precipitating cloud systems from CloudSat radar measurements. *J. Geophys. Res.: Atmos.* (1984-2012), 2008, 113(D8): D00A05. doi: 10.1029/2007JD009633.
- [19] Tyynelä J, Leinonen J, Moisseev D, et al. Radar backscattering from snowflakes: comparison of fractal, aggregate, and soft spheroid models. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2011, 28(11): 1365-1372.
- [20] 胡帅, 高太长, 刘磊. 非球形气溶胶粒子散射特性及其等效 Mie 散射误差分析. *气象科学*, 2014, 34(6): 612-619.
HU Shuai, GAO Taichang, LIU Lei. Analysis on scattering characteristics and equivalent Mie scattering errors of non-spherical atmospheric aerosols. *Journal of the Meteorological Sciences* (in Chinese), 2014, 34(6): 612-619.
- [21] Draine B T, Flatau P J. Discrete-dipole approximation for scattering calculations. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, 11(4): 1491-1499.
- [22] 张培昌, 戴铁丕, 杜秉玉. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 2002: 10-188.
ZHANG Peichang, DAI Tiepi, DU Bingyu. *Radar meteorology*. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 2002: 10-188.
- [23] Mätzler C. Microwave dielectric properties of ice, I: Thermal microwave radiation-applications for remote sensing. Stevenage: Institution of Engineering and Technology, 2006: 455-462.
- [24] Baum B A, YANG Ping, Heymsfield A J, et al. Bulk scattering properties for the remote sensing of ice clouds, Part II: Narrow-band models. *J. Appl. Meteor.*, 2005, 44(12): 1896-1911.
- [25] FU Qiang. An accurate parameterization of the solar radiative properties of cirrus clouds for climate models. *J. Climate*, 1996, 9(9): 2058-2082.
- [26] Heymsfield A J. Properties of tropical and midlatitude ice cloud particle ensembles. Part II: Applications for mesoscale and climate models. *J. Atmos. Sci.*, 60(21): 2592-2611.
- [27] Atlas D, Matrosov S Y, Heymsfield A J, et al. Radar and radiation properties of ice clouds. *J. Appl. Meteor.*, 1995, 34(11): 2329-2345.
- [28] Brown P R A, Francis P N. Improved measurements of the ice water content in cirrus using a total-water probe. *J. Atmos. Oceanic Sci. Technol.*, 1995, 12(2): 410-414.
- [29] LIU Chunlei, Illingworth A J. Toward more accurate retrievals of ice water content from radar measurements of clouds. *J. Appl. Meteor.*, 2000, 39(7): 1130-1146.
- [30] Aydin K, TANG Chengxian. Relationships between IWC and polarimetric radar measurands at 94 and 220 GHz for hexagonal columns and plates. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1997, 14(5): 1055-1063.
- [31] Matrosov S Y, Reinking R F, Kropfli R A, et al. On the use of radar depolarization ratios for estimating shapes of ice hydrometeors in winter clouds. *J. Appl. Meteor.*, 2001, 40(3): 479-490.