

94\220 GHz 星载雷达双波长比对非球形冰晶云参数敏感性分析

吴举秀¹ 窦芳丽² 安大伟² 顾瑜³ 周青⁴ 刘伟¹

WU Juxiu¹ DOU Fangli² AN Dawei² GU Yu³ ZHOU Qing⁴ LIU Wei¹

1. 山东省气象局大气探测技术保障中心, 山东, 济南, 250031

2. 国家卫星气象中心, 北京, 100081

3. 青岛市气象局, 山东青岛, 266003

4. 中国气象局气象探测中心, 北京, 100081

1. *Ensuring Center of Atmospheric Sounding Technology, Weather Bureau of ShanDong Province, Jnan 250031, China*

2. *National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081, China*

3. *Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China*

4. *Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

2018-03-16 收稿, 2018-7-24 改回

吴举秀, 窦芳丽, 安大伟, 顾瑜, 周青, 刘伟. 2019. 94\220 GHz 星载雷达双波长比对非球形冰晶云参数敏感性分析. 气象学报, 77 (待刊)

Wu Juxiu, Dou Fangli, An Dawei, Gu Yu, Zhou Qing, Liu Wei. 2019. Sensitivity of dual wavelength reflectivity ratio of 94\220 GHz space-borne radars to the cloud parameters with non-spherical ice crystals. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(in press)(in Chinese)

Abstract: The dual wavelength reflectivity ratio (DWR) of 94\220 GHz radar to non-spherical ice clouds were obtained based on the scattering characteristics of ice crystals with different shapes, and the relationships between the DWR and the cloud parameters were analyzed, then the vertical profiles of the unattenuated and attenuated radar reflectivity factors and DWR were studied. The results are as follows: (1) The DWR are sensitive to the size and shape of particles, the attenuation from clouds and the median maximum dimension of the particles size distribution (PSD) even to 0.1mm, but insensitive to the particle concentration and shape parameters of the PSD. (2) When the sensitivity of radar receiver is certain, the ability to detect cloud thickness of space-borne radars depends on the wavelengths of radars, the vertical profiles of the ice water content(IWC), the thickness of the

资助课题: 国防科工局“十二五”项目“太赫兹测云成像技术研究”, 科技部公益性行业专项(GYHY201406033); 国家自然科学基金(41305031); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD);

作者简介: 吴举秀, 主要从事雷达气象学研究。E-mail: gurunmin@163.com

cloud and the attenuation. In the condition of no attenuation correction, the DWR relate to the attenuation and the maximum is decided by the detected cloud thickness , while the more IWC and shorter wavelength are, the larger attenuation is. As a result, the two radars can detect the ice clouds with $IWC = 0.001 - 0.1 \text{ g/m}^3$ and thickness in 2 km, furthermore, 94% thickness can be explored if the ice clouds with $IWC = 0.001 - 0.2 \text{ g/m}^3$ and thickness in 5 km. (3) when the dielectric factors of water are using in the two radars' meteorological equations, it is necessary that the DWR are obtained after directly detected echo intensity are corrected.

Key words: Non-spherical ice particles, 94\220 GHz space-borne cloud radars, Dual wavelength reflectivity ratio, Parameters of ice particles size distribution

摘要: [资料和方法]利用不同形状冰晶的散射特性, [目的]获得了非球形冰晶云的 94\220 GHz 测云雷达双波长比 DWR(dual wavelength reflectivity ratio), [结果]探讨了非球形冰晶云的 DWR 与云内微物理参数的关系, 分析了衰减前后的星载雷达反射率因子及 DWR 的垂直廓线。 [结论]结果表明: (1) DWR 可以反映小到 0.1 mm 中值尺度的冰粒子, 对粒子总数、谱的形状参数不敏感, 对粒子大小、形状、云衰减较敏感。(2) 雷达灵敏度一定时, 星载雷达可测云厚和雷达波长、IWC 的垂直分布、云厚及衰减有关; 没有进行衰减订正时, DWR 和衰减有关, 冰水含量 (ice water content , IWC) 越大、波长越短, 衰减越大, DWR 最大值和可探测云厚有关。两部雷达可探测 IWC 为 $0.001 - 0.1 \text{ g/m}^3$ 、厚 2 km 的冰云; 当云厚 5 km、IWC 垂直分布在 $0.001 - 0.2 \text{ g/m}^3$ 时, 云厚的 94% 基本可以被 220 GHz 云雷达探测到。(3) 如果两部雷达气象方程中用水的介电因子, 测量回波强度应进行介电因子的订正后再计算 DWR。

关键词: 非球形冰晶; 星载 94\220 GHz 云雷达; 双波长比; 冰晶谱参数

中图法分类号: P412.25

1 引言

[研究的意义]云是由大气中水汽凝结成的水滴、过冷水滴、冰晶或者它们混合组成的, 是卫星反演、数值预报、气候模式研究中不确定性的主要来源之一。随着毫米波技术的不断发展, 毫米波测云雷达探测灵敏度、探测能力不断提高, 在云物理、云降水机制及大气辐射研究中起着越来越重要的作用 (Kollias et al, 2007; Battaglia et al, 2013)。毫米波雷达工作频率为大气气体对电磁波吸收最小的频段, 中心频率分别在 35 GHz、94 GHz、140 GHz 及 220 GHz 附近, 波长越小, 云及降水对电磁波的衰减越大, 因此目前毫米波测云雷达主要应用在 ka 波段(中心频率在 35 GHz 左右, 波长在 8.6 mm 左右)和 W 波段(中心频率在 94 GHz

左右，波长为 3.2 mm 左右）。[前人研究进展]国际上自 20 世纪 60 年代开始发展测云毫米波雷达，并逐渐增加双极化及多普勒功能，用来探测非降水云或者弱降水云（Lhermitte, 1988, 1990; Kropfli and Coauthors, 1995; Hogan et al, 2000; Kollias et al, 2007; 吴举秀等, 2014）。毫米波雷达主要为地基或机载，目前星载的毫米波雷达是 CloudSat 卫星搭载的 94 GHz 云廓线雷达，实现首次从空间采用主动毫米波遥感对云体垂直结构进行探测，结合其他卫星产品反演可以得到云分类、液态水/冰水含量、辐射通量和加热率等(Stephens et al, 2008)。我国自 20 世纪 80 年代开始研制 Ka 波段云雷达，安徽四创电子有限公司、中国电子科学集团公司第十四所、中国气象研究院与航天研究二院第 23 所等已研制出多种型号的 Ka 波段云雷达用于云物理研究（仲凌志等, 2009; 黄书荣等, 2017; 王喆等, 2016）。近年来我国开始研制 W 波段云雷达，2013 年安徽四创电子有限公司研制成功机载 W 波段云雷达（Wu et al, 2014），首部地基 W 波段多普勒双极化云雷达目前已完成出厂验收（吴举秀等, 2017）。220 GHz 雷达的研制和应用国际上较少，1988 年美国研制了 215 GHz 云雷达主要用来研究层状云和雾，由于衰减较大测量结果具有很大不确定性（Mead et al, 1989）。粒子对 94、220 GHz 电磁波的后向散射能力较大，因此 94、220 GHz 测云雷达体积较小，适合装载在卫星上，首部 W 波段雷达的研制成功为我国星载雷达的实现奠定了基础。波长较短的雷达，器件设计比较困难，加工精度要求较高，An Dawei（2014）评估了 220 GHz 雷达的发射机、接收机、天线组成及大气传播效应，目前我国正在研制 220 GHz 测云雷达。

在测定云粒子大小、液态水及冰水含量、粒子有效半径时，单毫米波雷达反演具有一定的不确定性，假设水云粒子谱为对数分布，利用毫米波雷达反演液态水含量误差可达 50%（Fox and Illingworth, 1997）。Brown 和 Francis（1995）利用飞机测量的冰晶谱及 94 GHz 雷达探测回波强度反演了冰水含量，误差在-50%—100%，认为如果提供冰粒子大小，误差将减少到-30%—40%。利用两部云雷达反演，根据云粒子对两个波段电磁波散射的差异，可以获得云粒子更多信息，Hogan 等（2000）联合 35、94 GHz 两部云雷达反演了卷云冰晶粒子大小，Sassen 等（2005）利用激光雷达及 S、Ka、W 波段雷达研究了融化层的散射特征，探讨了融化层的反演模式。衰减主要来自液态水（Lhermitte, 2002），Battaglia 等（2014）分析认为 G 波段（110—300GHz）雷达可以大大提高对边界层的层云、中层冰云、卷云和降雪的探测能力，因此 220 GHz 雷达如果装载在卫星上用来探测冰云具有很大优势。由于冰云中冰晶形状复杂，冰云微物理参数反演存在很大的不确定性，双频探测可以获得云更多信息，从而提高云中粒子的反演精度。[本研究切入点]目前我国准备发展星载 W 波段（约 94 GHz 左右）、G 波段（主要约在 220—240 GHz 左右）的双频测云雷达，W 波段雷达可以垂

直探测云的三维结构，220 GHz 雷达主要用来探测冰云，利用双波长比来增加对云的反演精度，减小微物理参数反演的不确定性。而且这两个波段测云雷达的发展，对云的参数化、数值天气预报、全球气候模式等方面的发展也具有重要意义，有关专家也对 220 GHz 云雷达可探测云的高度、波长不同带来介电因子差异而影响 DWR 的结果如何处理等方面非常感兴趣，国内很少有这方面的文献，**[拟解决的关键问题]**因此本文主要探讨不同冰云散射模型情况下，94\220 GHz 雷达双波长比和冰云微物理特性的关系以及星载雷达对冰云的可探测高度，分析 DWR 计算中应该注意的细节问题，进一步研究星载双频雷达测云的可行性。冰云中不同形状冰晶粒子对这两个波段电磁波的散射特性为作者前期工作 **(吴举秀等, 2016)**。

2 基本理论

两部雷达同时探测，可以获得回波强度的双波长比 DWR (dual wavelength reflectivity ratio, 单位: dB),文中定义为:

$$DWR=10\log_{10}(Z_{94} / Z_{220}) \quad (1)$$

Z_{94} 、 Z_{220} 分别指 94、220 GHz 雷达探测的回波强度 (单位, mm^6/m^3)。理论上回波强度即雷达反射率因子用下式计算:

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

式中, λ 是雷达波长, D_{\max} 是最大粒子的最大尺度, D 是粒子的最大尺度。 $\sigma(D)$ 为后向散射截面, K_i 为冰的介电因子, $K_i = (m_i^2 - 1) / (m_i^2 + 2)$, m_i 是冰晶的复折射指数, 波长为 3.2 mm、1.36 mm 时, 冰的复折射指数可分别取 1.7831+0.002i、1.7831+0.005i **(Mätzler, 2006)**。雷达实际采用的气象方程中, 一般使用水的介电因子 $|K_w|^2$, 其中

$K_w = (m^2 - 1) / (m^2 + 2)$, m 是水的复折射指数, 则对于冰云, 不考虑衰减损耗的等效雷达反射率因子可表示为 **(Hogan等, 2006)**:

$$Z_i = Z_e \times |K_i|^2 / |K_w|^2 \quad (3)$$

两部雷达探测的回波强度出现差异时, DWR 不等于 0, 才能探讨 DWR 和云内微物理参数的关系。当粒子都处于两个波段的瑞利散射区, 不考虑衰减时理论上 DWR 应为 0 dB。

雷达反射率因子取决于云的滴谱及云粒子后向散射截面等, 根据 **Heymsfield 等 (2002)**、**Kosarev 等 (1991)**、**Baum 等 (2005)**, 中纬度冰云冰晶谱可以取伽马分布, 谱的中值尺度

D_m (the median maximum dimension of the distribution) 和粒子谱的形状参数 μ 具有如下关系:

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\beta D) \quad (4)$$

$$D_m = \frac{2.97 + \mu}{\beta} \quad (5)$$

其中, N_0 是滴谱的浓度, β 为斜率, D 为粒子最大尺度。

实际上云及降水的衰减较大, 探测到的回波强度需进行衰减订正, 云层的光学厚度 τ_n 表示为 (Lhermitte, 2002):

$$\tau_n = \exp\left(-2 \sum_{i=1}^{n-1} k(i) \Delta R\right) \quad (6)$$

其中 ΔR 是距离库长度, $k(i)$ 是第 i 个距离库的衰减系数。根据衰减订正的逐库订正法 (张培昌和王振会, 2001), 第 n 个距离库雷达实际测量得到的反射率因子 Z_m (mm^6/m^3) 和真实反射率因子 Z_r (mm^6/m^3) (假设等于理论计算的结果 Z_e) 的关系为:

$$Z_m(n) = Z_r(n) \tau_n \exp(-k(n) \Delta R) \quad (7)$$

其中 $k(n)$ 是第 n 个距离库的衰减系数, 衰减系数的定义见文献吴举秀等 (2016)。

不考虑云、雨等的衰减, 考虑收发损耗及匹配滤波器的损耗, 根据雷达气象方程可以推导出回波强度 Z 的计算公式:

$$Z = 10 \log\left(\frac{1024 \ln 2 \lambda^2 p_t}{|K|^2 \pi^3 p_r \tau \theta^2}\right) + 20 \log R - 2G_0 + L_\Sigma + L_p + RL_{at} + 150 \quad (8)$$

其中, Z (dBZ) 为回波强度, p_t (KW) 为发射脉冲峰值功率, λ (mm) 为波长, τ (μm) 是脉冲宽度, θ 是波束宽度, G_0 (dB) 为天线的增益, L_Σ (dB) 是馈线系统的收、发损耗, L_p (dB) 为匹配滤波器的损耗, L_{at} 是大气损耗, 公式右侧的 150 是将距离、功率、波长等参数从国际标准单位转化为雷达气象中常用单位而产生的值, $|K|^2$ 是粒子的介电因子。将毫米波雷达相应的参数带入公式 (8), 可得到雷达探测灵敏度。

文中冰晶粒子的具体形状依据散射特性数据库取 11 种 (Liu, 2008), 不同形状粒子的密度随着粒子大小是变化的。各个形状冰晶的最大尺度范围、等质量球半径、形状参数、后向散射及衰减特性等见文献 (吴举秀等, 2016), 非球形冰晶的散射特性利用离散偶极子近似法获得的。冰晶形状分别为: 长柱状(Long column)、短柱状(Short column)、厚柱状(Block

column)、厚板状(Thick plate)、薄板状(Thin plate)、3 瓣子弹花(3-bullet-rosette)、4 瓣子弹花(4-bullet-rosette)、5 瓣子弹花(5-bullet-rosette)、6 瓣子弹花(6-bullet-rosette)、星状雪花(Sector snowflake)、树枝状雪花(Dendrite snowflake)。

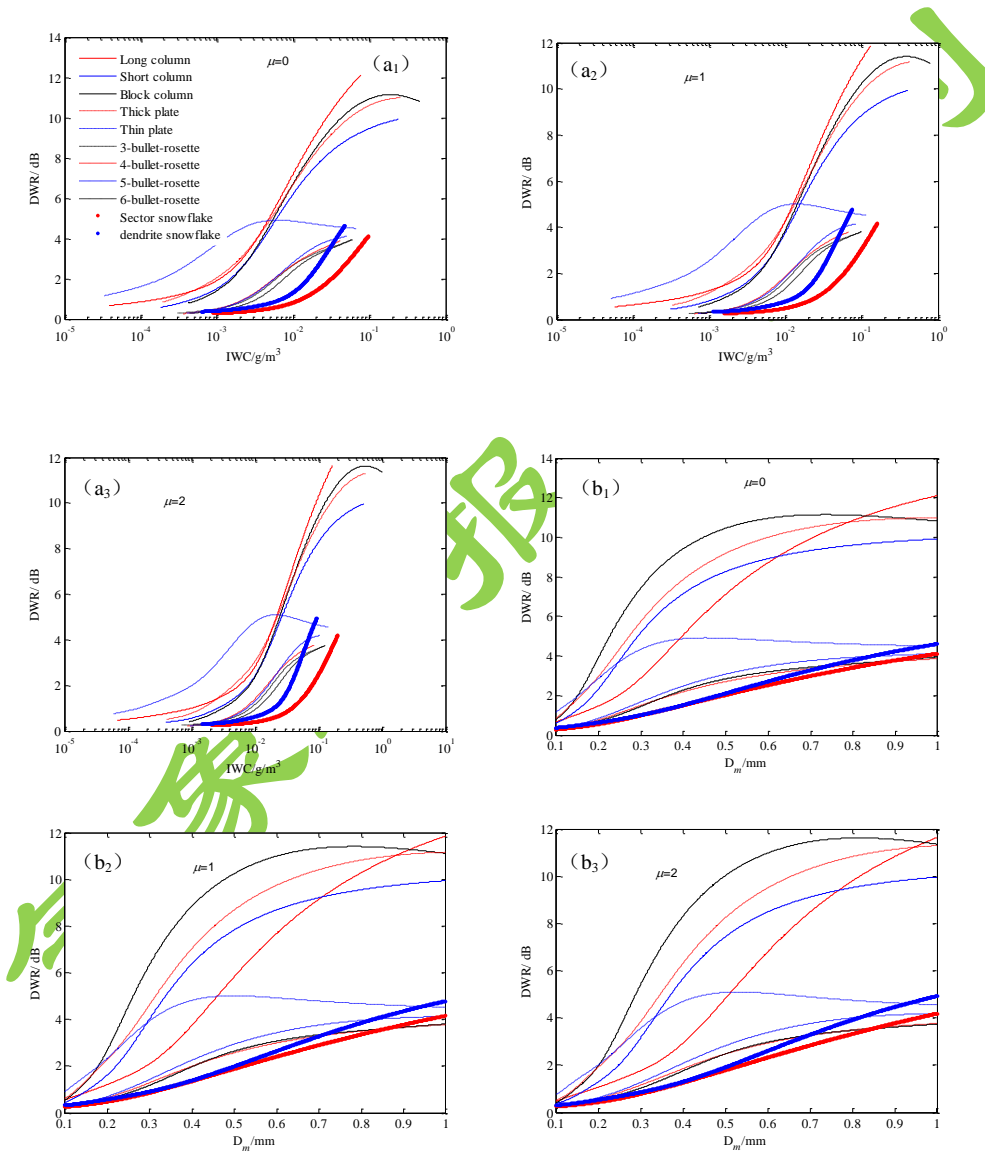
3 非球形冰晶云的双波长比

假设两部雷达气象方程中的介电因子 $|K|^2$ 都用冰的, 利用上面的公式 (2)、(4)、(5) 及后向散射截面可以计算 Z_e , 获得对应的双波长比 DWR。如果两部雷达气象方程中的 $|K|^2$ 都用水的, 水的 $|K|^2$ 随温度、波长是变化的, 具体取值见文献 Lhermitte (2002), 94、220 GHz 两个频段对应介电因子相差很大, 则测量的回波强度应根据公式 (3) 进行订正, 订正后再计算 DWR, 否则由于 220 GHz 电磁波对水的 $|K|^2$ 小于 94 GHz 的, 造成 DWR 最小值为负值, 无法正确反映所测冰云参数。同理, 如果 220 GHz 雷达取冰的介电因子, 94 GHz 雷达取水的介电因子, 应对 94 GHz 雷达回波进行介电因子的修正后, 再求冰云的 DWR。根据文献 Lhermitte (2002), 假设雷达气象方程中 94 GHz 的 $|K|^2=0.75$ (水的介电因子), 220 GHz 的 $|K|^2=0.414$ (水的介电因子), 则由等式 (3) 可知, 94 GHz 的探测结果应增加约 6.3 dB, 220 GHz 的应增加约 3.7 dB, 然后再求 DWR。

3.1 单形状冰晶云的双波长比 DWR

假设单层冰云中只有一种形状的冰晶, 固定温度 $T=233.15$ K, 计算不同滴谱分布、冰水含量、粒子尺度条件下的两种波长的雷达反射率因子, 得到双波长比。根据粒子总数 N 和粒子滴谱的关系, 可得对应的粒子滴谱浓度; 根据粒子滴谱、粒子的等质量等效半径及其对应的密度可以求冰水含量 IWC, 具体见文献 (吴举秀, 2016)。由于冰晶最大尺度 D_{max} 都大于 0.05 mm, 并且结合文献 (Baum et al, 2005; Dowling and Radke, 1990), D_m 取 0.1–1 mm, 粒子总数取较典型的值 $N=0.01/\text{cm}^3$ 。当 $\mu=0、1、2$ 时, 双波长比 DWR 随 IWC ($a_1、a_2、a_3$)、中值尺度 D_m ($b_1、b_2、b_3$)、有效尺度 D_e ($c_1、c_2、c_3$) 的变化见图 1, 粒子有效尺度 D_e 取粒子谱的 3 阶矩与 2 阶矩的比值。可以看出, DWR 基本在 0.5–12 dB, 随着粒子 IWC 的增加, 双波长比 DWR 基本上是增加的。IWC 相同时, 雪花具有较小的 DWR, 最大值约为 5 dB; 在 IWC 小于约 0.003 g/m^3 时, 薄板状六角形冰晶具有最大的 DWR, 当 IWC 增加时, 其他几种六角形冰晶具有较大的 DWR; 因此如果 IWC 小于 0.1 g/m^3 , DWR 超过 5

dB，冰晶形状基本可判断为六角形。随着粒子大小（中值尺度、有效尺度）的增加，DWR也增加，DWR对六角形冰晶的大小较敏感；相同滴谱时，六角形冰晶（除了薄板状冰晶）有较大的DWR，子弹花和雪花的DWR较小且差别较小；根据雷达反射率因子的定义，DWR与粒子浓度无关。在有效尺度及中值尺度为0.1 mm时（照射体积内粒子有小于0.1 mm的，也有大于0.1 mm的），许多粒子已处于220 GHz毫米波的米散射区，其后向散射能力小于瑞利散射，此时94 GHz雷达主要是瑞利散射（吴举秀等，2016），因此DWR大于零。可以看出，DWR对 μ 不敏感，随着 μ 减小DWR有轻微增加，但是IWC是轻微减小的。



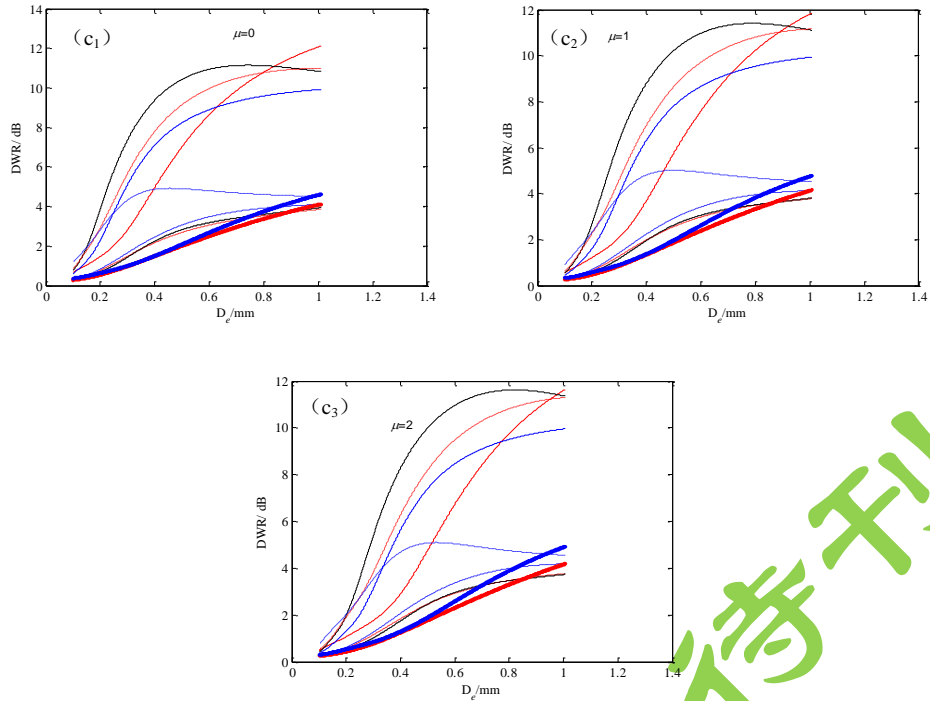


图1 DWR 随 IWC (a_1 、 a_2 、 a_3)、 D_m (b_1 、 b_2 、 b_3)、 D_e (c_1 、 c_2 、 c_3) 的变化

Fig.1 Changes of DWR with the IWC (a_1 , a_2 , a_3), D_m (b_1 , b_2 , b_3) and D_e (c_1 , c_2 , c_3)

2.2 具体形状冰云模型的 DWR

体积散射与使用的冰云体积散射模型有关，实际冰云中 含有各种形状的冰晶，不同形状的冰晶具有不同的比例，Baum 等 (2005) 通过分析机载及气球携带的粒子探测器探测结果，获得了适用于中纬度冰云的体积散射模型： $D < 60 \mu\text{m}$ ，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，其中 D 为粒子的最大尺度。文中利用此模型进行计算冰云的回波强度，上面提到的形状中没有聚合物及中空六棱柱，因此用 5 瓣子弹花代替聚合物、六棱柱代替中空六棱柱，滴晶为准球形用瑞利散射计算；六棱柱取长柱状，六角平板取厚板状 (Fu, 1996)，子弹花取 5 瓣。计算时温度取 233.15K， N 分别取定值 0.01， $0.1/\text{cm}^3$ ， D_m 在 0.1–1mm 范围内取值， μ 分别取 0、1、2。DWR 随 IWC (a_1 、 b_1)、 D_m (a_2 、 b_2)、 D_e (a_3 、 b_3) 的变化见图 2。可以看出，DWR 基本在 0.5–12 dB，在 N 不变时，DWR 随 IWC、 D_m 、 D_e 增加；粒子总数 N 增加，IWC 增加，但 DWR 不变，即 DWR 对单位体积内的粒子总数 N 的变化不敏感，因此 IWC 增加引起的 DWR 变化主要是粒子大小的变化引起的。在 D_m 或 D_e 相同时， μ 对 DWR 的影响较小，最大约 1 dB，即

DWR 对 μ 不敏感。DWR 对粒子大小较敏感，对小粒子也较敏感。粒子有效尺度达到 0.1mm 时，DWR 也大于 0 dB。在这种散射模型下，无法体现粒子形状的影响。

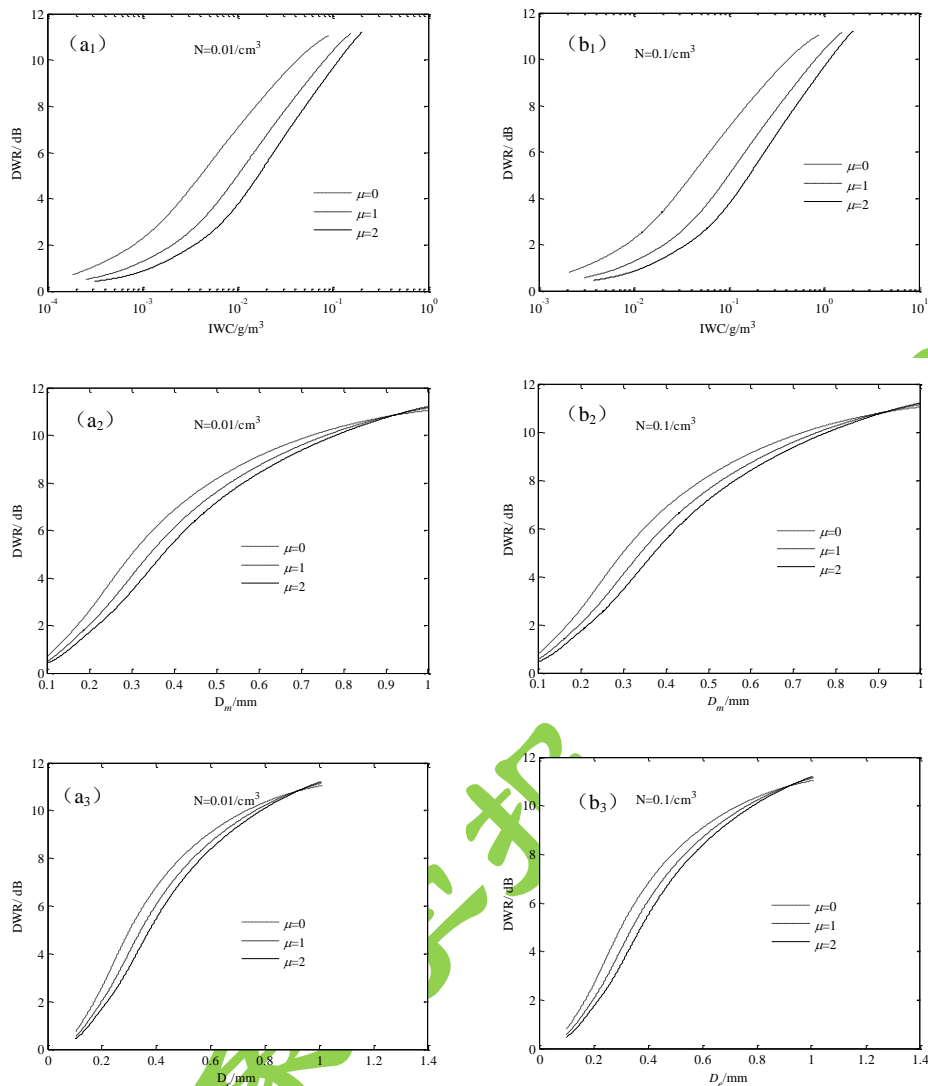


图2 DWR 随 IWC (a₁、b₁)、D_m (a₂、b₂)、D_e (a₃、b₃) 的变化

Fig.2 Changes of DWR with the IWC (a₁ and b₁), D_m (a₂ and b₂) and D_e (a₃ and b₃)

4 双频雷达对冰云的探测高度

前面对 DWR 的探讨没有考虑冰云的衰减，实际上雷达探测到的回波强度是衰减后的，云雷达可测云厚和衰减有关；如果不进行衰减订正，计算的 DWR 和衰减也有关。将雷达接收机可测到的最小功率及雷达相关参数带入公式 (8)，可以获得不同距离处雷达可测最小反射率因子，Cloudsat 星载云廓线雷达在大气中可探测的最小雷达反射率因子为 -26 dBZ，气象方程中 $|K|^2$ 取 0.75 (Stephens et al, 2008)，假设 94、220 GHz 两部星载雷达的探测能力和 Cloudsat 星载云廓线雷达相当，因为文中两个波段的云雷达 $|K|^2$ 取 0.177，因此两部雷

达对冰云探测到的最小雷达反射率因子为-20 dBZ。利用不同的滴谱，依据文献 Dowling and Radke (1990)，构建几条冰云的 IWC 廓线，然后利用前面的等式 (2)、(4)、(5) 分别计算 94、220 GHz 雷达的 Z_e (冰云衰减前)，再利用等式 (6)、(7) 得到 Z_m (冰云衰减后)，最后获得对应 DWR。

假设冰云符合前文介绍的基于 Baum 等 (2005) 的体积散射模型， $D_m=0.1-1\text{mm}$ ，高度取 10-5 km， μ 及 N 取不同值，则冰水含量垂直廓线、衰减前的雷达反射率因子 Z_e 、DWR 及衰减后的雷达反射率因子 Z_m 、DWR 如图 3 所示。IWC 廓线设置为随高度降低先增大后减小，云中部 IWC 最大 (a_1 、 a_2)。可以看出，当粒子总数较多时，IWC 较大，最大达 2g/m^3 ，对应的 Z_e 较大，同时衰减增大，因此 Z_m 变小。冰水含量相同时，冰云对 220 GHz 毫米波衰减较大，当 $N=0.01/\text{cm}^3$ 、 $\mu=2$ 、 $\text{IWC}=0.2\text{g/m}^3$ 时， Z_e 与 Z_m 差别很大，衰减超过 10 dBZ (c_1)，而 94 GHz 毫米波此时的 Z_e 与 Z_m 几乎一致，衰减可以忽略不计 (b_1)；当 IWC 增加到 2g/m^3 时，220 GHz 毫米波衰减达到近 150 dB (c_2)，94 GHz 的衰减只有约 15 dBZ (b_2)；因此探测同样 IWC 的冰云，220 GHz 毫米波由于衰减大穿透距离较小。在云顶由于波束经过的路径较小，衰减订正前后的 DWR 基本一致；距离增大后，衰减订正前后的 DWR 相差很大，差别的程度和 IWC 有关 (d_1 、 d_2)。假设两部雷达从极轨卫星向下探测，在大气中能探测到的最小雷达反射率因子为-20 dBZ，冰水含量垂直分布为 $0.0001-0.2\text{g/m}^3$ 时 (a_1)，220 GHz 毫米波可以穿透约 4.5 km 的厚度 (c_1)，94 GHz 毫米波可以穿透近 4.82 km 的厚度 (b_2)，DWR 约在 0.5-20 dB (d_1)，在 IWC 最大时 DWR 达到最大值；冰水含量垂直分布为 $0.001-2\text{g/m}^3$ 时 (a_2)，则 220 GHz 毫米波仅穿透 2.2 km 左右的厚度 (c_2)，94 GHz 毫米波穿透约 4.8 km 的厚度 (b_2)，DWR 最大值约为 48 dB (d_2)。因此，可测 DWR 的距离取决于 220 GHz 毫米波的穿透距离，IWC 越大，衰减越大，穿透距离越小。也可以看出，冰云顶部较薄，当云顶冰晶粒子很小且 IWC 约小于 0.001g/m^3 时，雷达反射率因子小于-20 dBZ，雷达也无法探测到 (b_1 、 c_1)。

冰水含量在 $0.001-0.2\text{g/m}^3$ ，高度约在 9.8-5.2 km 时 (a_1)，220 GHz 毫米波可以穿透约 4.3 km 的厚度 (c_1)，94 GHz 毫米波可以穿透整层云 (b_1)，DWR 达到约 21 dB (d_1)。同理分析冰水含量在 $0.001-0.9\text{g/m}^3$ 时可知，220 GHz 毫米波可以穿透约 2.7 km 的厚度，94 GHz 毫米波可以探测 4.9 km，DWR 达到约 45 dB。因此，DWR 对衰减很敏感，相同含水量

的云对 220 GHz 衰减大，对两部雷达来说，含水量越大，衰减越大，所以实际探测时 DWR 对含水量很敏感。

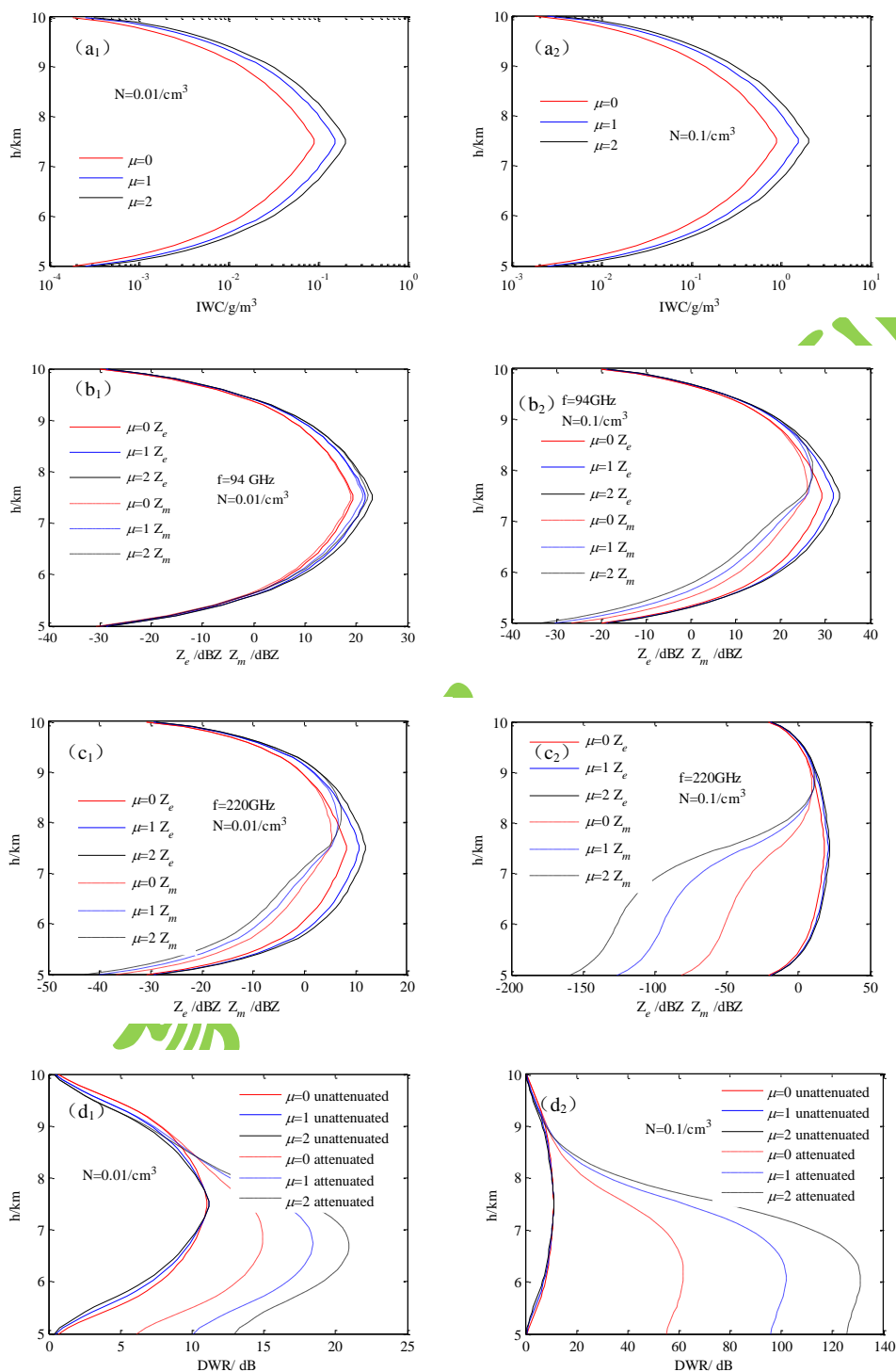
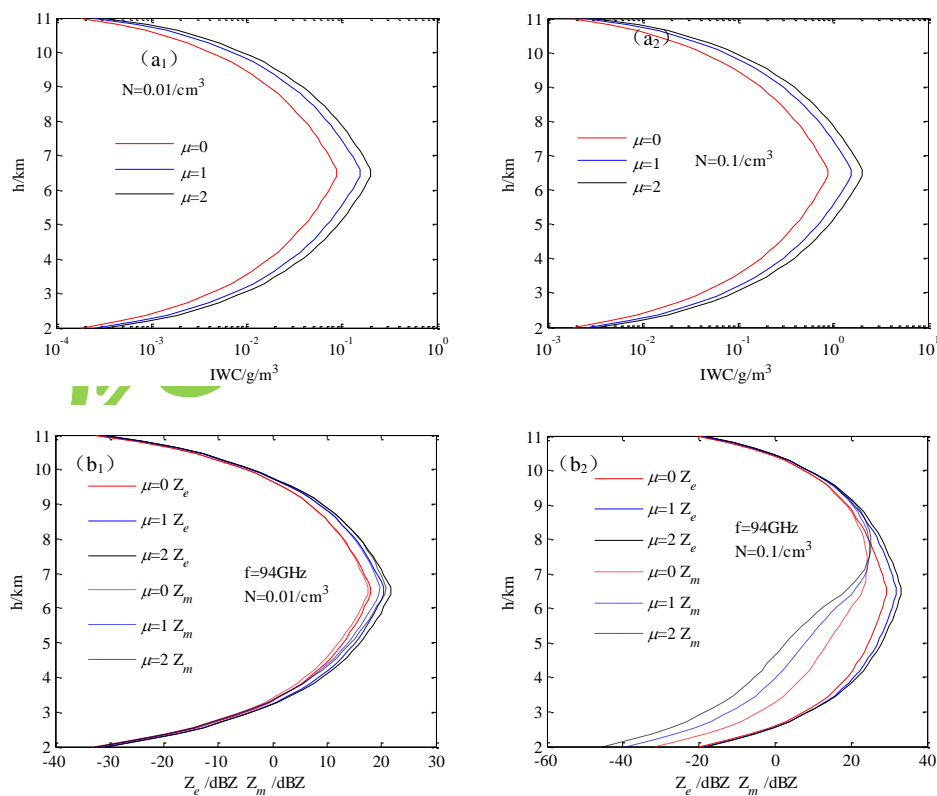


图 3 h=10—5 km, 冰水含量的垂直廓线 (a₁、a₂)、等效雷达反射率因子及衰减后的雷达反射率因子 (94 GHz: b₁、b₂; 220 GHz: c₁、c₂)、DWR 的垂直廓线 (d₁、d₂)

Fig.3 h=10—5 km, the vertical profiles of the water content (a₁ and a₂), the equivalent radar reflectivity factors, the radar reflectivity factor after attenuation (b₁ and b₂. 94 GHz, c₁ and c₂. 220 GHz), and the DWR (d₁ and d₂)

假设高度取 11–2 km，分别取 $D_m=0.09-0.9$ mm、 $D_m=0.1-1$ mm， μ 及 N 取不同值时，则冰水含量、等效雷达反射率因子、衰减后的雷达反射率因子、DWR 的垂直廓线如图 4。当两部雷达在大气中可探测最小雷达反射率因子为 -20 dBZ 时，IWC 垂直分布在 0.0001–0.16 g/m³，220 GHz 毫米波可穿透约 8.2 km 冰云，3.2 km 高度以下的冰云 220 GHz 雷达探测不到，94 GHz 毫米波能穿透约 8.6 km；在高度较低时，衰减前后的 DWR 相差较大，衰减前 DWR 约在 0.5–10.5 dB，衰减后则约在 0.5–23.4 dB。IWC 垂直分布在 0.001–2 g/m³ 时，94 GHz 毫米波基本可以穿透 8.1 km 冰云，220 GHz 毫米波仅穿透约 3.3 km 冰云，DWR 最大达到 40 dB，低处的云测不到；如 IWC 最大值为 0.9 g/m³，两部雷达可测厚度增加约 0.6 km，DWR 最大值基本不变 (a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2)。以上分析可见，220 GHz 雷达探测不到 IWC 超过 1 g/m³ 的冰云。 μ 对衰减前的 DWR 影响不大，但对衰减后的 DWR 影响较大，因为 μ 影响滴谱斜率，从而影响 IWC，因此影响到衰减。

当冰云高度取 10–3 km，冰水含量 IWC 在 0.001–0.1 g/m³ 时，整层云的雷达回波强度都超过 -20 dBZ，两部雷达可以穿透 7 km 冰云，DWR 最大约 20 dB；冰水含量 IWC 垂直分布在 0.001–0.2 g/m³ 时，94 GHz 毫米波可以探测整层云，220 GHz 毫米波穿透约 6.25 km 冰云，DWR 最大约 23 dB (a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1)。



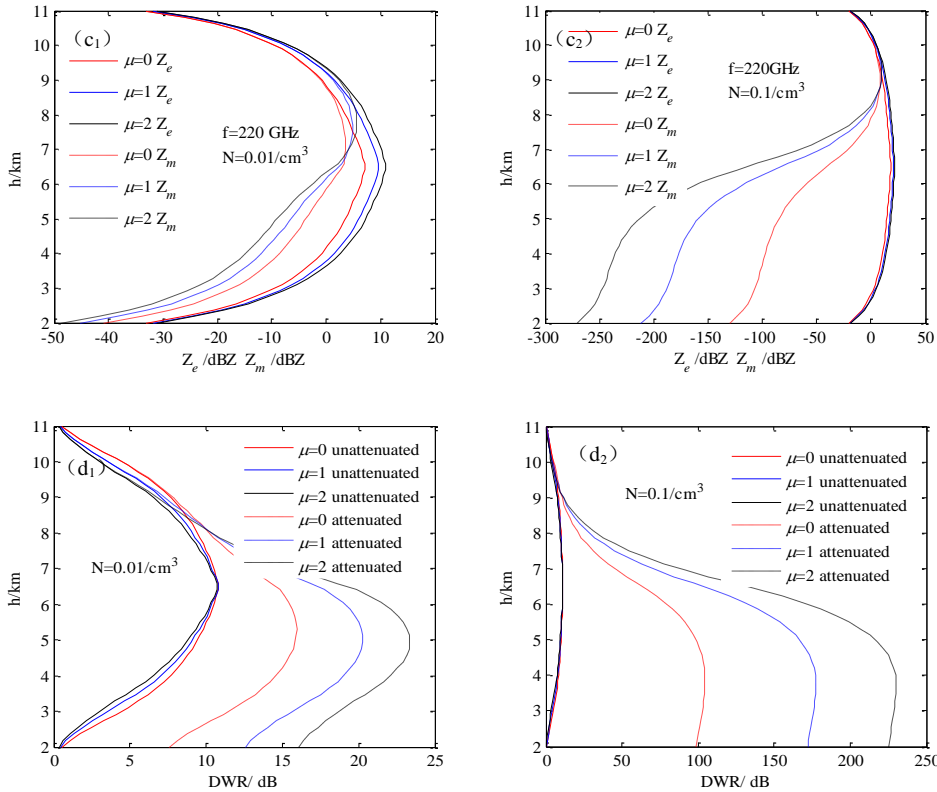
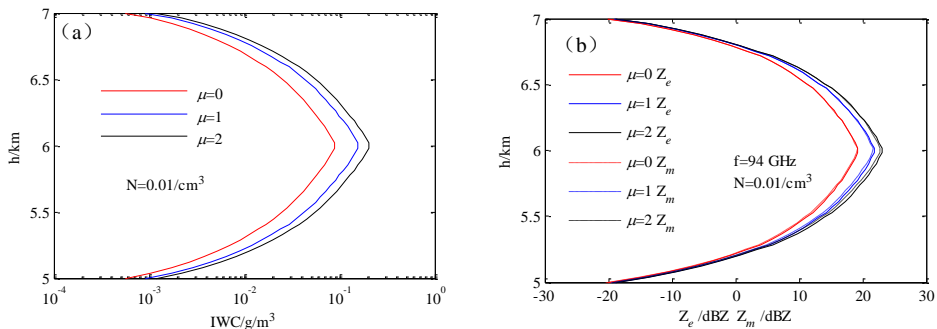


图4 h=11-2 km, 冰水含量的垂直廓线(a₁、a₂)、等效雷达反射率因子及衰减后的雷达反射率因子(94 GHz: b₁、b₂; 220 GHz: c₁、c₂)、DWR 的垂直廓线 (d₁、d₂)

Fig. 4 h=11-2 km, the vertical profiles of the water content (a₁ and a₂), the equivalent radar reflectivity factors, the radar reflectivity factor after attenuation (b₁ and b₂, 94 GHz, c₁ and c₂, 220 GHz), and the DWR (d₁ and d₂)

假设云厚 2 km, IWC 垂直分布在 0.001-0.2 g/m³, 雷达反射率因子、DWR 见图 5, 云顶最小雷达反射率因子超过 -20 dBZ, 94 GHz 雷达可以探测到整层云, 220 GHz 雷达可穿透约 1.95 km, DWR 在 1-14.7 dB; IWC 垂直分布的最大值为 0.1 g/m³ 之内时, 两部雷达可探测高度基本不变, DWR 最大值减小了约 1 dB。也可以看到, 如果回波强度进行了严格衰减订正后再计算 DWR, 对于以上不同厚度及含水量的冰云, DWR 最大值基本不超过 12 dB。



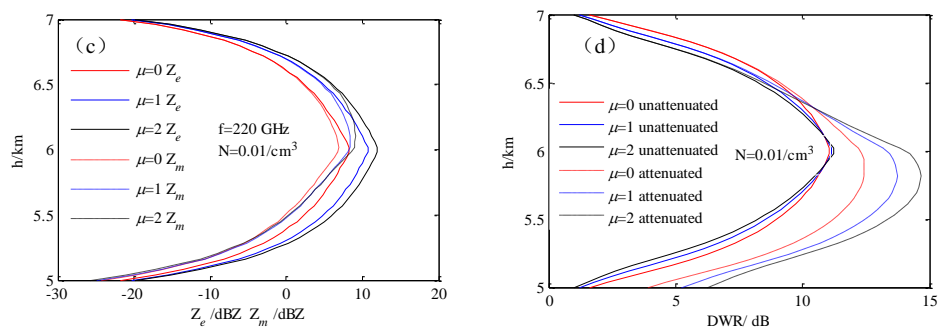


图 5 h=7-5 km, 冰水含量的垂直廓线 (a)、等效雷达反射率因子及衰减后的雷达反射率因子 (b: 94 GHz; c: 220 GHz)、DWR 的垂直廓线 (d)

Fig. 5 h=7-5 km, the vertical profiles of the water content (a), the equivalent radar reflectivity factors, the radar reflectivity factor after attenuation (b. 94 GHz, c. 220 GHz), and the DWR (d)

将以上分析结果列在表 1 中。利用相同的方法分析了云厚 5 km、IWC 垂直分布在 $0.001-0.2 \text{ g/m}^3$ 以及云厚 2 km、IWC 垂直分布在 $0.001-0.9, 0.001-2 \text{ g/m}^3$ 时的情况。从表中可以看出, 雷达从天顶向下探测, 在雷达灵敏度一定时, 探测高度和雷达波长、云厚、云内冰水含量及云 IWC 的垂直分布有关。探测到的双波长比主要取决于 220 GHz 云雷达的探测厚度, 由于假设最大 IWC 在云中部, 因此云厚在 9 km 内, 94 GHz 云雷达可探测云的最大冰水含量为 2 g/m^3 , 220 GHz 云雷达仅为 1 g/m^3 ; IWC 垂直分布在 $0.001-0.9 \text{ g/m}^3$ 的云, 94 GHz 云雷达几乎可以探测到整层云, 220 GHz 云雷达可探测高度和云厚有关, 云越厚, 衰减越大, 探测距离越小; IWC 垂直分布在 $0.001-0.2 \text{ g/m}^3$ 的云, 云厚 5 km 内, 94% 的云厚度基本可以被 220 GHz 云雷达探测到。中纬度卷云 IWC 通常小于 0.1 g/m^3 , 热带卷云的 IWC 通常小于 1 g/m^3 (Heymsfield and Miloshevich, 2003), 高层云云厚约 1-2 km, 由表 1 可知, 94、220 GHz 的雷达基本可以穿透中纬度的卷云, 获得较大的 DWR; 对于热带的卷云, 94 GHz 毫米波基本可以穿透, 220 GHz 毫米波可以穿透冰云的 89% 以上。我国主要处于中纬度地区, 可以用 220 GHz 云雷达探测卷云, 联合 94 GHz 云雷达进一步深化对卷云的研究; 对于含水量多的厚冰云, 220 GHz 云雷达探测不到的冰云下层可用 94 GHz 云雷达补充探测。

表 1 雷达探测距离和云 IWC、云厚的关系

Table 1 The relationships between detection range by Radar, the IWC and thickness of clouds

云厚(km)	IWC(g/m ³)范围	可探测距离(km)		DWR 最大值(dB)	可测 IWC 最大值(g/m ³)
		94 GHz	220 GHz		220 GHz
2	0.001-0.1	2	1.95	13.7	0.1
2	0.001-0.2	2	1.95	14.7	0.2
4.6	0.001-0.2	4.6	4.3	21	0.2
5	0.001-0.2	5	4.7	22	0.2
7	0.001-0.2	7	6.25	20	0.2
5	0.0001-0.2	4.82	4.5	21	0.2
9	0.0001-0.16	8.6	8.2	23.4	0.16
2	0.001-0.9	2	1.78	32.4	0.9
5	0.001-0.9	4.9	2.7	45	0.9
9	0.001-0.9	8.7	3.9	40	0.8
2	0.001-2	2	1.1	47	2
5	0.001-2	4.8	2.2	48	1.5
9	0.001-2	8.1	3.3	40	1

也可以看出, 利用 DWR 反演云参数时, 首先应该进行回波强度的衰减订正。分析上面云厚 2 km、IWC 垂直分布在 0.001-0.12 g/m³ 时的 DWR 和 IWC、DWR 和 D_m 关系 (图略) 可知, 如果没有进行衰减订正, DWR 偏大, IWC 在取值范围内的反演误差最大可达 900%, D_m 在取值范围内的反演误差最大超过 500%。

5 总结

主要分析了 94/220 GHz 雷达双波长比与冰晶谱参数及粒子大小的关系, 探讨了星载双频雷达对冰云的探测高度。

(1) 不考虑云衰减影响时, 两部雷达后向散射满足瑞利散射的条件不同, 双波长比 DWR 对冰粒子大小和形状可以提供一些关键性的信息。可以反映 0.1 mm 的中值尺度及有效尺度的冰粒子, 较小的粒子也可以获得较大的 DWR, 大粒子 DWR 较大。DWR 随着粒子谱的中值尺度增加而增加, 即随滴谱斜率增加而减小。六角形冰晶 (除了薄板状冰晶) 的 DWR 较大, 子弹花和雪花的 DWR 较小, 在没有云衰减的情况下, DWR 对 IWC 的敏感性依赖于粒子大小, 如果是粒子尺度增加引起的 IWC 增加, 则 DWR 随 IWC 增加而增加; 如果是粒子

总数增加引起的 IWC 增加, 粒子大小不变, 则 DWR 随 IWC 增加基本不变。DWR 与粒子浓度无关, 对单位体积内的粒子总数 N 及谱的形状参数 μ 的变化不敏感。

(2) 考虑衰减影响后, 由于 220 GHz 雷达的衰减大, DWR 变大, 含水量越多, 衰减越大。雷达灵敏度一定时, 雷达可测云厚和云水含量及其垂直分布有关, DWR 随云含水量增加而增加, DWR 最大值和可探测云厚度有关; 对于 IWC 最大值在云中部、厚度 9 km 内的冰云, 94 GHz 云雷达可探测的最大冰水含量为 2 g/m^3 , 220 GHz 云雷达仅为 1 g/m^3 ; 最大含水量一定时, 云厚度大衰减增加, 可测云厚的比例下降。如果两部雷达可测冰云的最低雷达反射率因子为 -20 dBZ, 两部雷达可探测冰水含量为 $0.001-0.1 \text{ g/m}^3$ 、厚 2 km 的冰云; 当云厚 5 km、IWC 垂直分布在 $0.001-0.2 \text{ g/m}^3$ 时, 云厚的 94% 基本可以被 220 GHz 云雷达探测到。除了衰减的原因, IWC 及冰晶粒子很小的浅薄云, 回波强度小于雷达可测最小反射率因子, 雷达也无法探测到。220 GHz 毫米波雷达可以用来探测高层冰云, 对厚冰云可用 94 GHz 雷达探测, 利用 DWR 分析高层冰云粒子的大小可以增加反演结果的准确性。

(3) 在计算中两部雷达都取冰的介电因子, 获得冰云的 DWR。实际应用中两部雷达方程中一般取水的介电因子, 因为两个频段对应水的介电因子差别很大, 造成 DWR 最小值为负值, 无法正确反映所测冰云的参数, 所测雷达反射率因子应进行订正后再计算冰云的 DWR。

(4) 文中是基于雷达装载在极轨卫星上假设雷达可探测最小反射率因子的, 如果雷达装载在静止卫星上, 由于静止卫星距离地球远, 在相同雷达灵敏度下, 雷达对云可探测最小反射率因子变大, 则对冰云的探测能力大大降低。可探测高度是基于两部云雷达灵敏度和 CloudSat 星载云雷达一样进行分析的, 如果两部云雷达的探测灵敏度不一样或探测灵敏度改变, 探测距离则会发生变化。反演云参数时, 应该先进行 DWR 的衰减订正, 关于衰减订正的探讨, 特别是 220 GHz 雷达非球形冰晶云衰减系数和回波强度关系式研究是下一步要做的工作。文中是假设冰晶数密度随高度不变的条件, 构建了几条较简单的冰水含量廓线作为参考进行探讨冰云衰减及雷达探测高度的, 实际上不同冰云的含水量垂直廓线是千差万别的, 冰晶数密度随高度也可能是变化的, 后续还将通过开展同步观测试验来收集数据, 从而对衰减算法及雷达探测能力展开进一步的研究。

参考文献

- 黄书荣, 吴蕾, 马舒庆等. 2017. 结合毫米波雷达提取降水条件下风廓线雷达大气垂直速度的研究. 气象学报, 75(5):823-834. Huang Shurong, Wu Lei, Ma Shuqing, et al. 2017. Extraction of atmospheric vertical velocity from observations of WPR combined with millimeter-wavelength radar during precipitation. Acta Meteorologica Sinica, 75(5): 823-834 (in Chinese)
- 王喆, 王振会, 曹晓钟. 2016. 毫米波雷达与无线电探空对云垂直结构探测的一致性分析. 气象学报, 7(5): 815-826. Wang Zhe, Wang Zhenhui, Cao Xiaozhong. 2016. Consistency analysis for cloud vertical structure derived from millimeter cloud radar and radiosonde profiles. Acta Meteorologica Sinica, 74(5): 815-826 (in Chinese)
- 吴举秀, 魏鸣, 周杰. 2014. 94GHz 云雷达回波及测云能力分析. 气象学报, 72(2): 402-416. Wu Juxiu, Wei Ming, Zhou Jie. 2014. Echo and capability analysis of 94 GHz cloud radars. Acta Meteorologica Sinica, 72(2): 402-416 (in Chinese)
- 吴举秀, 窦芳丽, 安大伟等. 2016. 非球形冰晶在 94/220 GHz 毫米波的散射特性模拟计算. 红外与毫米波学报, 35(3): 377-384. Wu Juxiu, Dou Fangli, An Dawei, et al. 2016. Simulation of scattering characteristics of non-spherical ice crystals with 94/220 GHz millimeter-wavelength. J Infrared, 35(3): 377-384 (in Chinese)
- 吴举秀, 魏鸣, 苏涛等. 2017. W 波段和 Ka 波段云雷达探测回波对比分析. 海洋气象学报, 37 (2): 57-64. Wu Juxiu, Wei Ming, Su Tao, et al. Comparison of the echoes detected by W band and Ka band cloud radars. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(2): 57-64 (in Chinese)
- 张培昌, 王振会. 2001. 天气雷达回波衰减订正算法的研究(I): 理论分析. 高原气象, 20(1): 1-5. Zhang P C, Wang Z H. 2001. A study on algorithm to make attenuation correction to radar observations of radar reflectivity factor (I): theoretical analysis. The plateau weather, 20 (1) : 1-5 (in Chinese)
- 仲凌志, 刘黎平, 葛润生. 2009. 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, 24(4): 383-391. Zhong Lingzhi, Liu Liping, Ge Runsheng. 2009. Characteristics about the millimeter-wavelength radar and its status and prospect in and abroad. Advances in Earth Science, 24(4): 383-391 (in Chinese)
- An Dawei, Jian Shang, Qiong Wu, et al. 2014. Remote sensing of clouds and evaluation with a 220 GHz radar. Proc SPIE 9259, Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation
- Battaglia A, Tanelli S, Kollias P. 2013. Polarization diversity for millimeter space-borne Doppler radars: an answer for observing deep convection. J Atmos Ocean Tech, 30: 2768-2787
- Battaglia A, Westbrook C D, Kneifel S, et al. 2014. G band atmospheric radars: new frontiers in cloud physics.

Atmos Meas Tech, 7:1527-1546

- Baum B A, Heymsfield A J, Yang P, et al. 2005. Bulk scattering properties for the remote sensing of ice clouds, Part I: Microphysical data and models. *Journal of Applied Meteorology*, 44(12): 1885-1895
- Brown P R A , Francis P N. 1995. Improved measurements of the ice water content in cirrus using a total-water probe. *Journal of Atmospheric and Oceanic Science Technology*, 12(2): 410-414
- Dowling D R, Radke L F. 1990. A summary of the physical properties of cirrus clouds. *Journal of Applied Meteorology*, 29(9): 970-978
- Fox N I, Illingworth A J. 1997. The retrieval of stratocumulus cloud properties by ground based cloud radar. *J Appl Meteor*, 36: 485-492
- Fu, Q. 1996. An accurate parameterization of the solar radiative properties of cirrus clouds for climate models. *Journal of climate*, 9(9): 2058–2082
- Heymsfield A J, Bansemmer A, Field P R, et al. 2002. Observations and parameterizations of particle size distributions in deep tropical cirrus and stratiform precipitating clouds: Results from in situ observations in TRMM field campaigns. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(24): 3457-3491
- Heymsfield A J, Miloshevich L M. 2003. Parameterizations for the cross-sectional area and extinction of cirrus and stratiform ice cloud particles. *J Atmos Sci*, 60: 936-956
- Hogan R J, Illingworth A J, Sauvageot H. 2000. Measuring crystal size in cirrus using 35 and 94 GHz radars. *J Atmos Oceanic Technol*, 17(1): 27-37
- Hogan R J, Mittermaier M P, Illingworth A J. 2006. The retrieval of ice water content from radar reflectivity factor and temperature and its use in the evaluation of a mesoscale model. *J Appl Meteorol Climatology*, 45: 301-317
- Kollias P, Clothiaux E E, Miller M M, et al. 2007. Millimeter-wavelength radars new frontier in atmospheric cloud and precipitation research. *Bull Amer Meteor Soc*, 88: 1608-1624
- Kosarev A L, Mazin I P. 1991. An empirical model of the physical structure of upper-layer clouds. *Atmospheric Research*, 26(3): 213-228
- Kropfli R A, Coauthors A. 1995. Cloud physics studies with 8 mm wavelength radar. *Atmos Res*, 35(2): 299-313
- Lhermitte R M. 1988. Observation of rain at vertical incidence with a 94 GHz Doppler radar: an insight on Mie scattering. *Geophys Res Let*, 15: 1125-1128
- Lhermitte R M. 1990. Attenuation and scattering of millimeter wavelength radiation by clouds and precipitation. *Atmos Oceanic Technol*, 7: 464-479

- Lhermitte R M. 2002. Centimeter&millimeter Wavelength Radars in Meteorology. Lhermitte Publications: 238-496
- Liu G S. 2008. A database of microwave single-scattering Properties for nonspherical ice crystals. Bulletin of the American Meteorological Society, 89(10): 1563-1570
- Mätzler C. 2006. Microwave Dielectric Properties of Ice, I: Thermal Microwave Radiation-Applications for Remote Sensing. Stevenage: Institution of Engineering and Technology: 455-462
- Mead J B, McIntosh R E, Vandemark D, et al. 1989. Remote sensing of clouds and fog with a 1.4-mm Radar[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 6(6): 1090-1097
- Sassen K, Campbell J R, Zhu J, et al. 2005. Lidar and triple-wavelength doppler radar measurements of the melting layer: A revised model for dark- and brightband phenomena. Journal of Applied Meteorology, 44(3): 301-312
- Stephens G L, Vane D G, Tanelli S Im E, et al. 2008. CloudSat mission: Performance and early science after the first year of operation. J Geophys Res, 113: D00A18
- Wu J X, Wei M, Hang X, et al. 2014. The first observed cloud echoes and microphysical parameter retrievals by China's 94-GHz cloud radar. Journal of Meteorological Research, 28(3): 430-443

气象学报