

吴举秀,马传成,陈庆亮,等,2018.合肥地区一次小雨过程的W波段云雷达的云物理特征分析[J].气象,44(3):416-424.

合肥地区一次小雨过程的W波段云雷达 的云物理特征分析*

吴举秀¹ 马传成¹ 陈庆亮¹ 刘伟¹ 张 骞² 王锡芳¹

1 山东省气象局大气探测技术保障中心,济南 250031

2 山东省气象台,济南 250031

提 要: 利用我国自己研制的W波段云雷达地基探测资料,分析了合肥一次小雨云系的微物理过程,然后利用两个不同地区的地基及机载探测资料,初步反演了水云及卷云的微物理参数。结果表明:(1)回波强度增大,多普勒速度、线性退极化比(LDR)、谱宽激增的地方为融化层顶,根据LDR亮带可初步判定融化层的厚度;(2)利用经验关系法,对卷云冰水含量和水云的液态水含量进行了反演,利用推导的公式反演得到冰晶云云粒子的有效半径;(3)利用逐库订正法对水云的回波强度进行订正,得到了衰减订正后的液态水含量,减小了反演误差。

关键词: W波段云雷达,云微物理特性,云微物理参数反演,LDR亮带,衰减订正

中图分类号: P412.25

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.03.008

Analysis on Cloud Physical Characteristics of a Light Rain Process in Hefei Detected by W-Band Cloud Radar

WU Juxiu¹ MA Chuancheng¹ CHEN Qingliang¹ LIU Wei¹ ZHANG Qian² Wang Xifang¹

1 Ensuring Center of Atmospheric Sounding Technology, Shandong Meteorological Service, Jinan 250031

2 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

Abstract: Using the data detected by the W-band ground radar developed by China, the physical process of a cloud system with light rain in Hefei was analyzed, and the microphysical parameters in the water cloud and cirrus cloud were retrieved preliminarily based on the data from two different regions detected by the ground and airborne W-band radars. The results showed that: (1) The corresponding height where the echo intensity increased, and the Doppler velocity, linear depolarization ratio (LDR) and spectral width suddenly increased was the top of melting layer, then the thickness of melting layer was initially estimated according the LDR bright band. (2) Using empirical relations, the ice and liquid water content of cirrus cloud and water cloud were retrieved, and the effective radius of ice crystal cloud particles were also obtained using the derived formula. (3) Using bin-by-bin correction method in the groups, the echo intensity of water cloud was corrected, then the liquid water content was retrieved based on the corrected echo intensity, so the retrieval errors were reduced.

Key words: W-band cloud radar, micro-characteristics of cloud, microphysical parameter retrieval, linear depolarization ratio (LDR) bright band, attenuation correction

* 国家自然科学基金项目(41305031)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306040、GYHY201406033)、山东省气象局面上课题(2015sdqxm13)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)共同资助

2016年10月13日收稿; 2018年1月1日收修定稿

第一作者:吴举秀,主要从事雷达气象学研究. Email: gurunmin@163.com

引言

云在数值预报、全球辐射收支平衡、人工影响天气及飞行安全中起着重要的作用,目前测云毫米波雷达已成为非降水云和弱降水云探测的有效工具,毫米波测云雷达主要有两个波段:Ka波段(波长约8.6 mm,频率约35 GHz)和W波段(波长约3.2 mm,频率约94 GHz)。美国空军自20世纪60年代开始研制TPQ-11型Ka波段云雷达用来替代云廓线测量仪监测机场的云(Kollias et al, 2007),80年代美国研制W波段云雷达开始应用于云物理和降水物理研究项目中(Lhermitte, 1987a),随后德国、英国、日本等国家也先后发展了自己的测云毫米波雷达,雷达系统逐渐增加了双极化及多普勒功能,可以用于识别云相态、湍流结构等(Kropfli et al, 1995; Hogan et al, 2000)。利用W波段测云雷达, Lhermitte(1987b)、Pazmany et al(1994)分别分析了小积云的结构特征及地形云的回波特征; Kollias and Albrecht(2000)研究了层积云内的湍流结构。吴举秀等(2014)利用英国的94 GHz Galileo测云雷达,结合35 GHz云雷达、地面雨滴谱计、雨量计和探空资料等,探讨了94 GHz雷达回波特征与云特性的关系及雷达测云能力。2006年发射的CloudSat是第一个搭载94 GHz云廓线雷达的卫星,仲凌志等(2010)利用云廓线雷达的探测结果研究了南方冰雪天气形成的云物理机制。20世纪80年代我国Ka波段云雷达开始研制,目前已有多个公司生产出不同型号的Ka波段云雷达用于云微物理研究(仲凌志等, 2009; 李思腾等, 2015; 武静雅等, 2016), 2007年我国第一部灵敏度较高的35 GHz多普勒双极化测云雷达研制成功,被用于云物理及云降水机制研究、航空气象保障、云内降水粒子形成的判别等(宗蓉等, 2014)。我国W波段云雷达研究起步较晚,2013年安徽四创电子有限公司863项目组研制成功一台机载W波段云雷达,目前该公司继续进行地基W波段多普勒双极化云雷达的研制。

云内液态水含量、云粒子有效半径、云粒子相态等云内微物理参数,对人工影响天气及数值预报的准确性具有重要的意义。利用毫米波测云雷达反演云内微物理参数主要有经验关系式(Fox and Illingworth, 1997)及多种传感器联合(Frisch et al, 1995; 1998; 2002)等方法。云的液态水含量(LWC)

或冰水含量(IWC)和云的类型有关, Fox and Illingworth(1997)获得了暖性层积云LWC、粒子有效半径反演的经验关系式; Frisch et al(1998)联合毫米波雷达和微波辐射计反演了层状云的微物理参数。Brown et al(1995)利用冰水含量探测器得出了卷云的IWC和毫米波雷达反射率因子(Z)之间的关系, Hogan et al(2006)、Protat et al(2007)使用米散射研究了中纬度非降水冰晶云的IWC- Z 关系。考虑冰的密度变化, Liu and Illingworth(2000)基于实测数据利用模型,得到了毫米波雷达的IWC- Z 关系。降水性冰云中非球形冰晶发展很大,具有超过0 dBz的回波强度,决定了云的冰水含量, Matrosov and Heymsfield(2008)假设冰晶为轴比(短轴与长轴之比)是0.6的椭球,基于CloudSat星载94 GHz雷达数据,计算了降水性冰云衰减系数(k)及IWC和 Z 之间的关系。Sauvageot and Omar(1987)根据飞机试验统计,发现当云的回波强度超过-15 dBz时,云内通常含有毛毛雨, Baedi et al(2000)统计得到了用于毛毛雨的LWC与毫米波雷达回波强度的关系。

毫米波云雷达的优势是探测非降水云或弱降水云,当探测中雨及大雨时,由于衰减太大,雷达信号无法穿透云顶,并且由于非瑞利散射,探测的回波强度会降低很多。因此,本文利用安徽四创电子有限公司研制的W波段云雷达地基及机载探测回波,首先分析一次小雨降水的微物理过程,然后利用经验关系式及对数分布得到的公式分别对两个不同地区的非降水冰晶云、含有毛毛雨的云进行LWC及有效半径的初步反演。

1 分析一次小雨天气的微物理过程

首先分析2013年9月6日在安徽合肥(31.821°N, 117.19°E)地基试验中W波段云雷达探测到一次小雨天气的云系结构变化。W波段云雷达试验前已进行了雷达定标检测,并与定型批量生产的Ka波段云雷达进行了对比观测,由于衰减大,W波段云雷达在探测厚云及降水时回波强度变小。根据天气资料(图略),试验地点处在气旋系统的外围、低压槽前、副热带高压控制下。探空资料来自离试验地点最近的安庆探空站,虽然安庆探空站距离雷达100多千米,但是安庆在合肥南边,天气过程从南向北移动,安庆探空具有很好的代表性。08时安

庆探空资料显示 9 月 6 日整层大气湿度较大, 大气较稳定, 云层深厚; 0°C 等温线在 5 km 以下。

1.1 探测回波

图 1 为 10:37—15:33(北京时, 下同)期间 6 个不同时段的地基观测回波, 包括回波强度、多普勒速度、线性退极化比(LDR)、谱宽。雷达垂直天顶扫

描, 因此多普勒速度主要反映了空气的垂直运动速度及粒子在静止空气中下落的速度, 负的多普勒速度表示粒子朝向雷达运动。可以看到, 10:40 左右(图 1a)云厚约 2.5 km, 云底高下降到约 8 km 处, 11:16 生成两层云, 随时间发展两层云开始融合, 11:24—11:26 谱宽对应一亮带(蓝色色标), 应为融化层(图 1b)。11:41(图 1c)云厚约 9 km, 然后开始

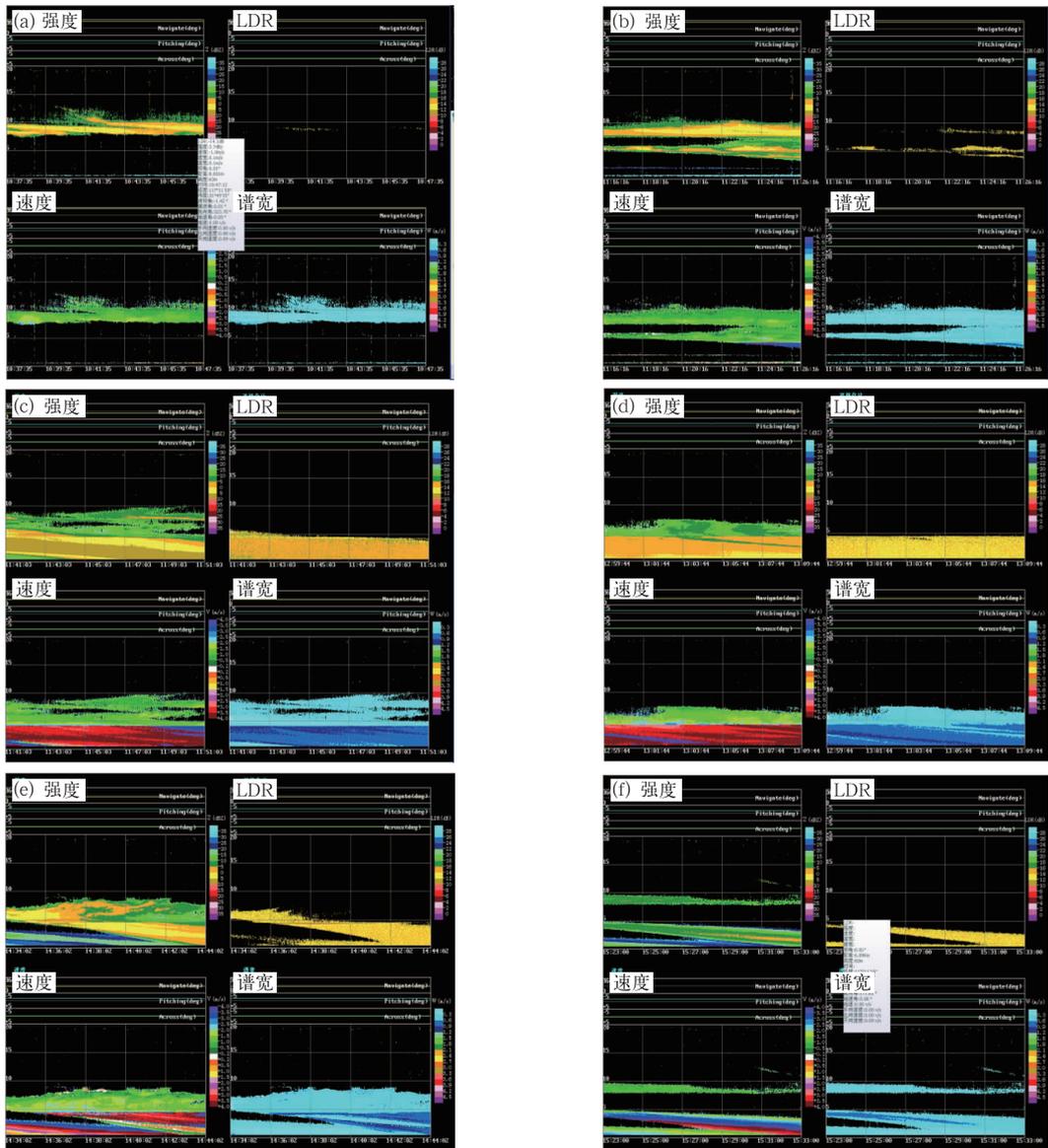


图 1 2013 年 9 月 6 日 6 个不同时段探测回波
(包括回波强度、多普勒速度、LDR、谱宽)

(a) 10:37—10:47, (b) 11:16—11:26, (c) 11:41—11:51, (d) 12:59—13:09,
(e) 14:34—14:44, (f) 15:23—15:33

Fig. 1 Detection echoes (echo intensity, Doppler velocity, LDR, and spectral width) during 6 different periods of time on 6 September 2013

(a) 10:37—10:47 BT, (b) 11:16—11:26 BT, (c) 11:41—11:51 BT, (d) 12:59—13:09 BT,
(e) 14:34—14:44 BT, (f) 15:23—15:33 BT

降小雨,回波强度随高度降低增大,在近地面雨滴先是有蒸发,因此雨滴变小,近地面回波强度降低,多普勒速度为正值区域是因为雨滴降落速度超过 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,出现了速度模糊。11:41—11:49(图 1c) LDR 图中约 5 km 下存在 LDR 大值区(黄色色标),根据探空资料,此处为 0°C 层,对应的回波强度、谱宽及速度也突然增大,因为冰晶在表面融化,下降速度增大,相当于体积逐渐增大的水球,水的介电因子是冰晶的 5 倍多,因此回波强度增大。13:09(图 1d),小雨继续下,雨滴变小,近地面回波强度达 5 dBz,然后小雨逐渐停止(图略),到 14:34(图 1e)云又发展成两层,云层融合后在 14:36—14:40 对应 LDR 有一明显的 -8 dB 左右(红色色标)亮带,为 0°C 层,14:44 地面又开始降小雨,云慢慢变薄,雨渐停,然后云又发展,增厚,开始降雨(图 1f),如此反复,直到 7 日雨停。

1.2 微物理过程

图 2 分别为 11:25、11:45 和 13:08 时的回波强度、多普勒速度、LDR、谱宽的垂直廓线,结合图 1 对此次降水的微物理过程进行了分析。

11:25 时(图 2a₁~2a₄),两层云。11:25 时云已发展为两层,高云厚约 3 km,向下的多普勒速度在 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,谱宽小于 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,云内为冰晶粒子,回波强度较大,已超过 0 dBz。中云厚 3.2 km,冰晶在下落中凝华增长, Z 增加,下落速度增加,谱宽基本在 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,到 5 km 时, Z 开始减小,但是多普勒速度继续增加,说明冰晶继续增大,进入非瑞利散射区,造成 Z 随粒子增大而减小,约到 4.3 km, Z 减小到极小值,然后又开始增大,说明部分冰晶粒子已增长到散射特性的震荡上升区,部分冰晶粒子增大处在散射特性的震荡下降区,综合的体积散射使 Z 开始增加。因为粒子在增长,所以其下落速度是增加的。根据探空资料,约 4.2 km 处是 0°C 层等温线,冰晶开始融化外包水膜,由于水的散射能力比冰的强,所以 Z 增大,外包水膜的冰球下落速度突然增大,对应多普勒速度突然由 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 激增为 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,对应谱宽也激增,超过 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此时云的 LDR 基本在 $-16 \sim -14 \text{ dB}$ 。

11:45 时(图 2b₁~2b₄),开始下雨。云继续发展,11:45 回波接地,开始下小雨。还是两层云, 0°C 等温线很明显,约在 4.4 km 处,对应 Z 、谱宽、多普

勒速度及 LDR 激增的高度。 Z 由 -8 dBz 激增为 0 dBz,多普勒速度由 $-2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 激增为 $-3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,谱宽由 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 突然增加到 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,LDR 约为 -12 dB 。随着冰晶融化,水膜增厚,散射能力增强, Z 随着增大,谱宽、多普勒速度也增大, Z 到达最大值后(约 4.1 km 处),对应多普勒速度为 $+3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,出现了速度模糊,实际下落速度应为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,此时 LDR 突然减小,对应为融化层底部,然后 Z 随着高度降低而减小,是因为冰晶融化成体积较小的水球,散射能力减小,另一方面粒子下落速度增加,造成照射体积内的粒子总数减小,因此回波强度变小。可以看出融化层厚度约为 300 m,图中两直线之间的区域即为融化层。然后雨滴在下落中碰并增长,散射能力增强,回波强度又开始增大,2 km 处雨滴实际下落速度约为 $5 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,根据静止空气中雨滴大小与下落速度的关系(Lhermitte, 2002),存在直径约为 1.5~2 mm 的雨滴,因为多普勒速度是功率谱密度的一阶距,所以雨滴最大直径超过 2 mm。由于刚开始下雨,近地面雨滴在下落中蒸发变小,因此 Z 变小。

13:08 时(图 2c₁~2c₄),雨中。13:08 时,继续下小雨,融化层约为 300 m,对应 LDR 约 -12 dB 。冰晶在下落中凝华增长, Z 增大, 0°C 等温线以上 Z 变小,主要是冰晶增大超过 1 mm,进入非瑞利散射造成的(吴举秀等,2016)。在融化层下边界,多普勒速度约 $4.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,则此时雨滴直径主要在 1 mm 之内,符合瑞利散射(Lhermitte, 2002)。随着雨滴下落增大,多普勒速度增加,部分雨滴直径超过 1 mm,进入散射震荡区,随粒子增大,散射能力降低(Lhermitte, 2002),部分雨滴还在瑞利散射区,随粒子增大,散射能力增大,因此体积散射能力基本保持不变, Z 随高度降低变化不大。在 3 km 处,较多粒子进入米散射区,造成 Z 变小,但速度还是增大的。然后雨滴继续增大, Z 增大,多普勒速度增大,近地面雨滴下落速度为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,因此根据 Lhermitte(2002)的研究,不考虑空气的速度影响,雨滴粒子主要在 1.5 mm 左右。

2 云内微物理参数初步反演

2.1 云内冰水、液态水含量初步反演

2013年12月4日,W波段云雷达用国产运七

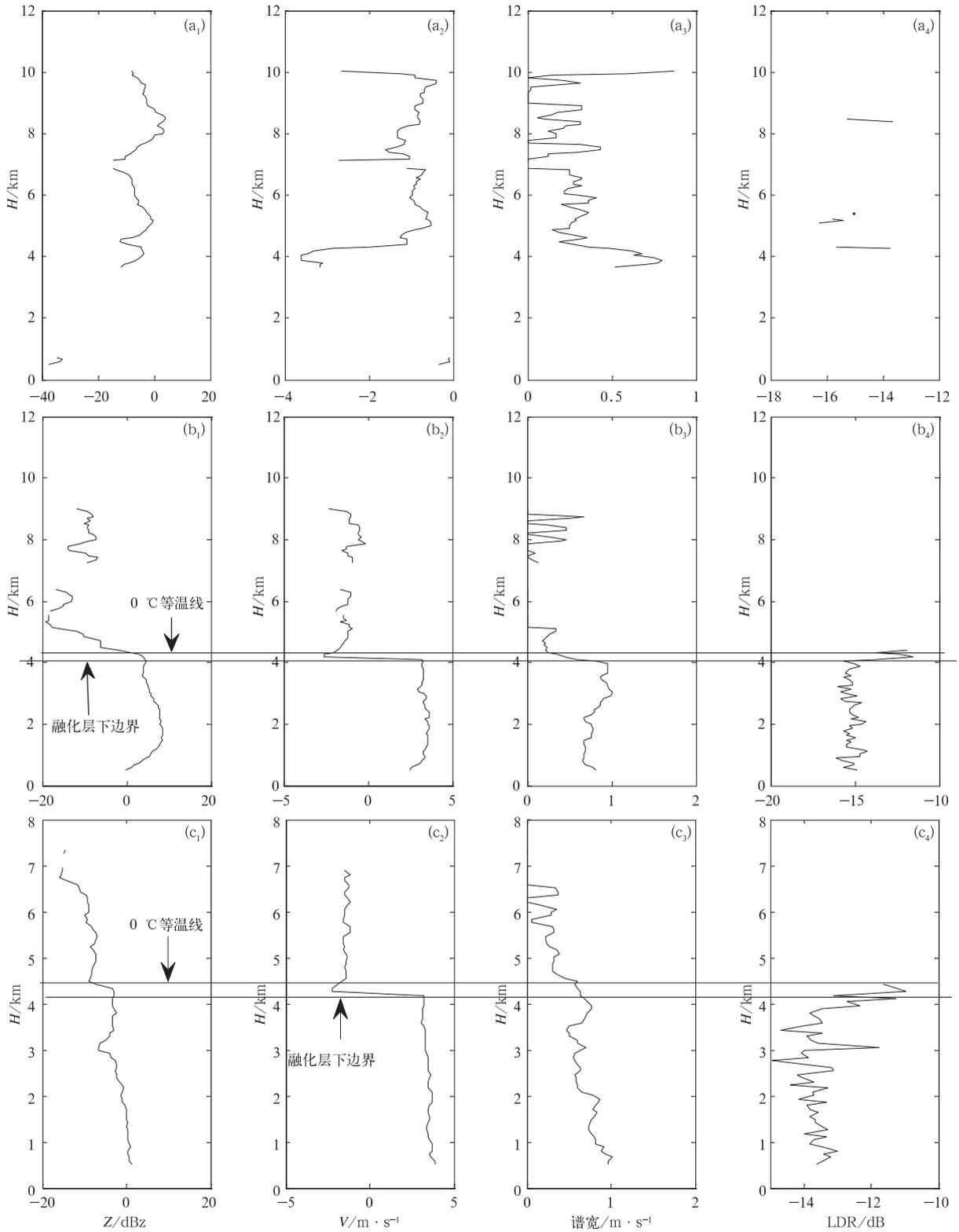


图 2 2013 年 9 月 6 日 3 个时刻的回波强度(a₁, b₁, c₁)、多普勒速度(a₂, b₂, c₂)、LDR(a₃, b₃, c₃)、谱宽(a₄, b₄, c₄)的垂直廓线
(a₁~a₄) 11:25, (b₁~b₄) 11:45, (c₁~c₄) 13:08

Fig. 2 Vertical profiles of echo intensity (a₁, b₁, c₁), Doppler velocity (a₂, b₂, c₂), LDR (a₃, b₃, c₃), and spectral width (a₄, b₄, c₄) at 3 times on 6 September 2013
(a₁~a₄) 11:25 BT, (b₁~b₄) 11:45 BT, (c₁~c₄) 13:08 BT

飞机作为载机平台进行了第一次机载探测试验,探空资料来自试验地点附近的探空站延安,探测中波束垂直指向地面,随惯导俯仰角、横滚角有变化,由于惯导俯仰角、横滚角变化很小,文中看做波束还是垂直地面扫描的,但是多普勒速度会受到惯导俯仰角、横滚角变化的影响,文中也没有考虑飞机惯导的精度对云探测高度的影响。试验地点在陕西延安、渭南市及运城市一带附近,14:25—14:29 飞机飞行空间区域见图 3,飞机飞行范围为 $35.777^{\circ} \sim 35.96^{\circ}\text{N}$ 、 $110.33^{\circ} \sim 110.69^{\circ}\text{E}$,飞行高度约 6.56 km 左右,波动范围 100 m 左右,横滚角为 -1.26° 左右,仰角 2.43° 左右,飞机穿云探测,距离短,所以云的衰减小。图 4 为探测到的回波强度、多普勒速度、LDR 和谱宽。可以看出,探测回波为卷云,云底高约在 5 km,由于飞机上方还有云,所以云顶高超过 6.56 km,根据探空 0°C 等温线在 1.5 km,因此卷云主要由冰晶组成,回波强度较小,在 0 dBz 之内,俯角 2.43° 左右,水平风的影响较小,多普勒速度主要反映垂直速度,因为飞机速度的影响,多普勒速度很乱,谱宽较大。因为冰晶非球形,LDR 约为 -16 dB 左右。1 km 左右处存在一条回波线,为地物回波,强度为 $5 \sim 30$ dBz,反映了地面的海拔高度及地表覆盖物的性质,LDR 很大,约为 $-10 \sim -2$ dB,这是由于不平坦的地面产生漫反射造成的。此时地物的多普勒速度主要反映了飞机的天向速度,因为地物不运动本身是没有速度的,飞机在波束传播方向的速度分量随横滚角、仰角变化,所以地物的速度主要

是飞机在垂直方向的速度分量。

使用 Wu et al(2013)的公式反演非降水冰晶云的 IWC,结果如图 5。可以看出,卷云的 IWC 在 $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之内,冰水含量较小,较符合统计结果(黄梦宇等,2005;2007)。其中,云内含水量较高,云底含水量较小。

利用不同文献提供的冰水含量关系式进行反演,得到 14:28:31 时刻的冰水含量的垂直廓线,如图 6 所示。可以看出,不同关系式反演的结果差异较大,其中 Brown et al(1995)和 Liu and Illingworth(2000)的反演结果较大,最小的是 Atlas et al(1995)的反演结果,与 Brown et al(1995)相差约 3 倍,Matrosov et al(2001)、Wu et al(2013)、Aydin and Tang(1997)这三者的反演结果接近。

2013年9月6日15:40—15:48存在多层云,



图 3 2013 年 12 月 4 日 14:25—14:29 飞行路线图

Fig. 3 Flight path during 14:25—14:29 BT 4 December 2013

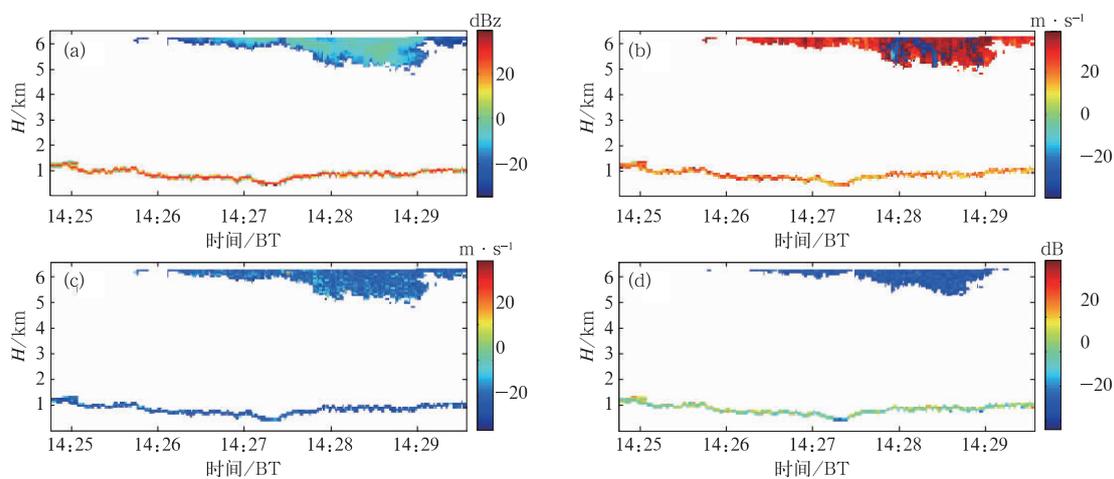


图 4 2013 年 12 月 4 日 14:25—14:29 回波强度(a)、多普勒速度(b)、谱宽(c)、LDR(d)

Fig. 4 Echo intensity (a), Doppler velocity (b), LDR (c), and spectral width (d) during 14:25—14:29 BT 4 December 2013

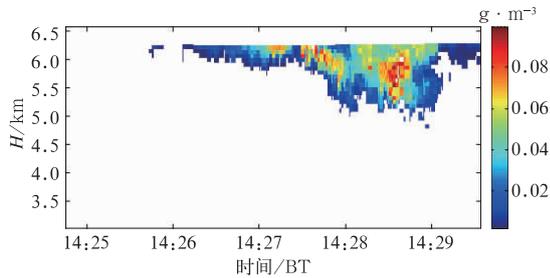


图5 2013年12月4日冰水含量反演结果
Fig. 5 Retrieval results of ice water content on 4 December 2013

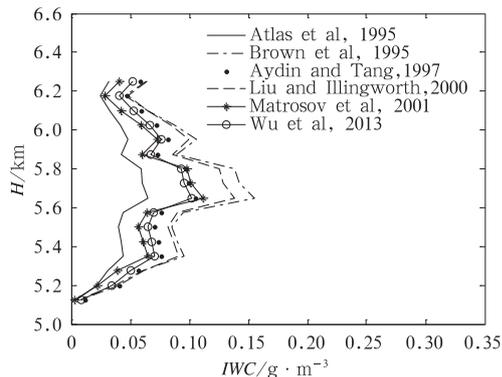


图6 不同关系式冰水含量反演结果
Fig. 6 Retrieval results of ice water content for several relations

下层为含有毛毛雨的水云,回波强度见图7a,由于人为设置,500 m以下无数据,下层水云超过-5 dBz,云内有毛毛雨或小雨。用 Baedi et al (2000)提供的关系式进行反演,结果如图7b所示。

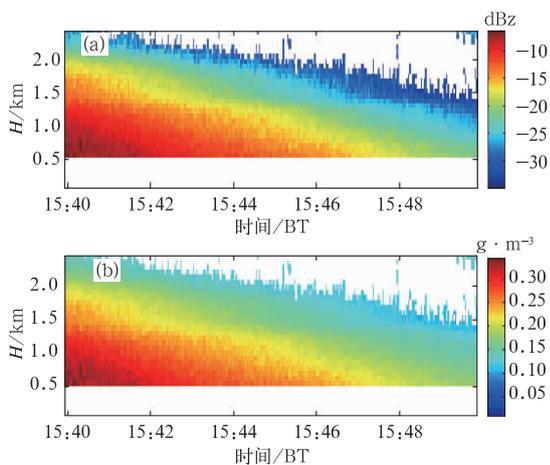


图7 2013年9月6日15:40—15:50的回波强度(a)、液态水含量反演结果(b)
Fig. 7 Echo intensity (a) and retrieval results of LWC (b) during 15:40–15:50 BT on 6 September 2013

水云含水量在 $0.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以内,与统计结果比较符合(黄梦宇等,2005;2007)。

由于衰减水云的回波强度会有所降低,利用逐库订正法,对2013年9月6日15:40—15:48的水云进行衰减订正,其中衰减系数 $k = aZ^b$ 关系式中的系数 a, b 分别取 0.0069 及 0.9820 (王振会等,2011)。订正后重新进行 LWC 反演,则订正前后 LWC 之差如图8。由于订正后 Z 的增加,因此造成反演的 LWC 增加。可以看出,订正后反演的 LWC 增加范围主要在 $0.005 \sim 0.025 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,因为衰减主要是液态水引起的,最大增量在含水量较大的地方,反射率因子大的地方对应衰减也大。

2.2 有效半径初步反演

假设粒子谱分布为对数正态分布, Z (单位: $\text{mm}^6 \cdot \text{mm}^{-3}$) 和有效半径 r_e (单位: μm) 的关系可表示为 (Frisch et al, 1995; 2002):

$$r_e = 50 \exp(-0.5\sigma^2) N^{-1/6} Z^{1/6} \quad (1)$$

式中, σ 是对数谱谱宽, N 是粒子数浓度。假设粒子的浓度及对数谱宽随高度不变, σ 取 0.31, 根据黄梦宇等(2007)的研究,冰晶的浓度取 13 cm^{-3} 带入式(1),得到非降水卷云有效半径的反演公式:

$$r_e = 30.97 Z^{1/6} \quad (2)$$

利用式(2)对2013年12月4日的卷云进行反演,得到结果如图9所示,可以看出卷云粒子有效半

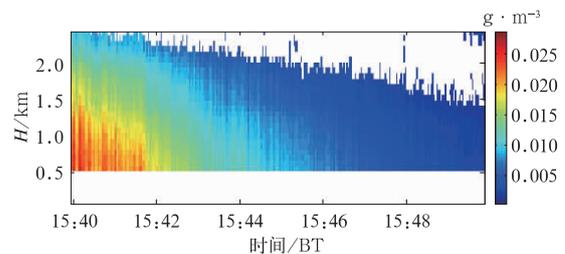


图8 2013年9月6日衰减订正前后反演的液态水含量之差
Fig. 8 Difference of LWC before and after attenuation correction on 6 September 2013

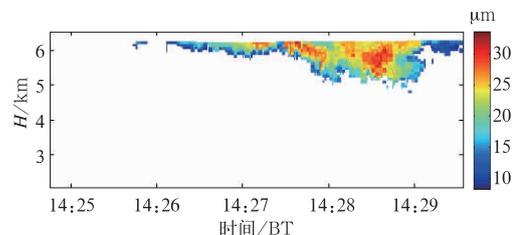


图9 2013年12月4日的冰云有效半径反演
Fig. 9 Effective radius retrieval of ice clouds on 4 December 2013

径约为 $8\sim 33\ \mu\text{m}$,符合文献统计(黄梦宇等,2007),云中粒子较大,云边界冰晶较小。

3 结 论

利用我国自己研制的W波段云雷达探测资料,分析了发生在安徽合肥的一次小雨云系的微物理过程,并对合肥探测到的小雨降水过程中底层的水云及在陕西延安附近测到的卷云微物理参数进行了初步反演。

(1) 根据回波强度、多普勒速度、LDR、谱宽等参数,可以初步分析云宏观特性及云内微物理变化,基本判断融化层的厚度及 0°C 等温线的高度, 0°C 等温线对应回波强度增大、多普勒速度、LDR、谱宽激增的高度。

(2) LWC的反演主要利用经验关系法,对非降水的卷云IWC及含有毛毛雨降水的底层水云进行了LWC反演;有效半径的反演主要通过通过对数分布,结合我国不同云状的滴谱分布,取对应的参数,推导出卷云的计算公式,进行反演得到云粒子的有效半径,反演结果基本符合统计。

(3) 在反演中考虑了衰减订正,衰减主要来自云中液态水。利用逐库订正法对水云的回波强度进行了订正,并利用订正后的回波强度进行LWC的反演,减小了反演的误差。

(4) LWC及有效半径主要利用不同的经验关系式进行反演,反演结果与回波强度误差、采用的公式等有关,结果仍需要进一步验证。可以联合其他的探测手段,提高微物理参数反演的精度。利用粒子的多普勒谱密度,将能提高云内粒子有效半径及LWC的反演精度,还可以得到较精确的空气垂直运动速度。由于机载回波的多普勒速度受飞机速度的影响,因此不方便直接分析探测目标的运动速度,应该将速度订正后再拿来用于分析云的动力特征。外包水膜的冰球造成融化层Z增大,因此融化层微物理参数的反演需要做进一步研究。

参考文献

黄梦宇,邓兆泽,赵春生,等,2007. 2005—2006年北京云滴数浓度的飞机观测[C]//中国气象学会2007年年会人工影响天气科技进展与应用分会论文集. 广州:中国气象学会,31-34.
黄梦宇,赵春生,周广强,等,2005. 华北地区层状云微物理特性及气

溶胶对云的影响[J]. 南京气象学院学报,28(3):360-368.
李思腾,马舒庆,高玉春,等,2015. 毫米波云雷达与激光云高仪观测数据对比分析[J]. 气象,41(2):212-218.
吴举秀,魏鸣,周杰,2014. 94 GHz云雷达回波及测云能力分析[J]. 气象学报,72(2):402-416.
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[J]. 红外与毫米波学报,35(3):377-384.
武静雅,刘黎平,郑佳锋,2016. 固态毫米波雷达探测模式的对比评估与分析[J]. 气象,42(7):790-798.
王振会,藤煦,纪雷,等,2011. 球形粒子毫米波k-Z关系研究[J]. 气象学报,69(6):1020-1028.
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[J]. 地球科学进展,24(4):383-391.
仲凌志,刘黎平,陈林,等,2010. 星载毫米波测云雷达在研究冰雪天气形成的云物理机制方面的应用潜力[J]. 气象学报,68(5):705-716.
宗蓉,刘黎平,银燕,2014. 基于飞机观测资料的降水粒子反射率因子阈值分析[J]. 大气科学学报,37(4):469-475.
Atlas D, Matrosov S Y, Heymsfield A J, et al, 1995. Radar and radiation properties of ice clouds[J]. J Appl Meteor, 34(11):2329-2345.
Aydin K, Tang C X, 1997. Relationships between IWC and polarimetric radar measurands at 94 and 220 GHz for hexagonal columns and plates[J]. J Atmos Oceanic Technol, 14(5):1055-1063.
Baedi R J P, De Wit J J M, Russchenberg H W J, et al, 2000. Estimating effective radius and liquid water content from radar and lidar based on the CLARE98 data-set[J]. Phys Chem Earth Part B Oceans Atmos, 25(10/11/12):1057-1062.
Brown P R A, Illingworth A J, Heymsfield A J, et al, 1995. The role of spaceborne millimeter-wave radar in the global monitoring of ice cloud[J]. J Appl Meteor, 34(11):2346-2366.
Fox N I, Illingworth A J, 1997. The retrieval of stratocumulus cloud properties by ground-based cloud radar[J]. J Appl Meteor, 36(5):485-492.
Frisch A S, Fairall C W, Snider J B, 1995. Measurement of stratus cloud and drizzle parameters in ASTEX with a Ka-band Doppler radar and a microwave radiometer[J]. J Atmos Sci, 52(16):2788-2799.
Frisch A S, Feingold G, Fairall C W, et al, 1998. On cloud radar and microwave radiometer measurements of stratus cloud liquid water profiles[J]. J Geophys Res, 103(D18):23195-23197.
Frisch S, Shupe M, Djalalova I, et al, 2002. The retrieval of stratus cloud droplet effective radius with cloud radars[J]. J Atmos Oceanic Technol, 19(6):835-842.
Hogan R J, Illingworth A J, Sauvageot H, 2000. Measuring crystal size in cirrus using 35- and 94-GHz radars[J]. 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 evaluating of a mesoscale model[J]. *J Appl Meteorol Clim*, 45(2):301-317.
- Kollias P, Albrecht B, 2000. The turbulence structure in a continental stratocumulus cloud from millimeter-wavelength radar observations[J]. *J Atmos Sci*, 57(15):2417-2434.
- Kollias P, Clothiaux E E, Miller M A, et al, 2007. Millimeter-wavelength radars; new frontier in atmospheric cloud and precipitation research[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 88(10):1608-1624.
- Kropfli R A, Matrosov S Y, Uttal T, et al, 1995. Cloud physics studies with 8 mm wavelength radar[J]. *Atmos Res*, 35(2-4):299-313.
- Lhermitte R, 1987a. A 94-GHz Doppler radar for cloud observations [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 4(1):36-48.
- Lhermitte R M, 1987b. Small cumuli observed with a 3 mm wavelength Doppler radar[J]. *Geophys Res Lett*, 14(7):707-710.
- Lhermitte R M, 2002. Centimeter&-millimeter Wavelength Radars in Meteorology[M]. Lhermitte Publications, 67-496.
- Liu C L, Illingworth A J, 2000. Toward more accurate retrievals of ice water content from radar measurements of clouds[J]. *J Appl Meteor*, 39(7):1130-1146.
- Matrosov S Y, Heymsfield A J, 2008. Estimating ice content and extinction in precipitating cloud systems from CloudSat radar measurements[J]. *J Geophys Res*, 113(D8):D00A05.
- Matrosov S Y, Roger F, Reinking, et al, 2001. On the use of radar depolarization ratios for estimating shapes of ice hydrometeors in winter clouds[J]. *J Appl Meteor*, 40:479-490.
- Pazmany A, Mead J, McIntosh R, et al, 1994. 95-GHz polarimetric radar measurements of orographic cap clouds[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 11(1):140-153.
- Protat A, Delanoe J, Bouniol D, 2007. The retrieval of ice water content from radar reflectivity factor and temperature and its use in evaluating a mesoscale mode[J]. *J Appl Meteorol Clim*, 45(2):301-317.
- Sauvageot H, Omar J, 1987. Radar reflectivity of cumulus clouds[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 4(2):264-272.
- Wu J X, Wei M, Zhou J, 2013. Relationship between the extinction coefficient and radar reflectivity factor of non-spherical ice crystals[J]. *J Remote Sens*, 17(6):1377-1385.