

# 试论弥散气象目标特性 ——气象雷达技术发展的关键因素

■ 李柏

气象弥散目标不是“刚体”，其外形时时刻刻都在发生变化；它对电磁波散射特性，没有固定不变的物理属性，而且不同相态特征的弥散气象目标的介电特性也不同。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.05.013

自第一部天气雷达问世以来，气象雷达就不断随着电子技术、集成电路技术、计算机技术、雷达技术的发展而发展；气象雷达也从早期单一的在降水时段的测雨雷达，扩展到晴空时段的气溶胶、风、温度、湿度等要素测量、有云时段的云宏观物理量和微观物理量测量，以及在气象灾害发生后，进行灾情调查与评估观测等。雷达系统也逐步形成晴空大气、云、降水以及致灾四个时段一体化观测技术体系。然而，无论是气象雷达技术进步与发展，还是气象雷达在哪个时段进行探测，有一个十分重要的问题始终没有一个清晰的概念，这就是雷达探测的气象目标的特性问题。这也是所有各类气象雷达系统中的信号处理器所需要解决的最为关键、最为复杂的问题。因此，气象目标特性是气象雷达技术发展中的一个最为重要的关键因素。

## 1 气象弥散目标

气象雷达技术发展，首先要考虑的问题就是气象雷达探测的目标对象。美国在WSR-88D雷达观测技术发展整个过程中，坚持WSR-88D雷达技术发展无论是其设备硬件，还是与之相配套的扫描策略和观测模式，天气是决定其发展最为关键的要素。这一目标对象的特征在很大程度上决定了气象雷达技术特点和发展方向，因此分析研究气象目标特性十分必要。气象雷达探测的目标与其他雷达探测目标，如军事目标中的飞机、军舰等有着很大的差异，因此，气象目标又称为弥散目标。本文就弥散现象和弥散气象目标进行阐述和分析。

### 1.1 弥散现象的定义

关于气象弥散现象，很多文献涉及但均未给出确切的定义。搜索网上可以得到如下定义与解析：通常

在微观层面，物质的传递可以由三种机制构成——扩散(Diffusion)+平流(advection)+弥散(dispersion)。

Dispersion(弥散)是在有平流存在的情况下发生的，由于流体流动时溶质的流动速度不均匀而引起的一种对扩散现象加强作用，也称弥散现象。

总而言之，当流体没有移动的时候，即平流不存在的时候，扩散照样存在。当平流存在的时候，弥散就出现了，这时弥散和扩散哪一个更重要呢，取决于平流的速度有多大。

大气中无论在边界层，还是在自由大气层，平流现象均十分显著。因此，大气中的云、雨降水受到平流影响十分显著。其目标就是属于弥散目标物，它返回雷达的信号是雷达采样体积内许许多多降水粒子贡献的总和。通过对返回信号幅度的处理，可以提取降水中降水粒子的散射特性，也就是通常提到的回波强度，它是和降水的强度紧密相关的。

### 1.2 弥散气象目标的主要特征

关于气象弥散目标特性，首先从水与能量循环角度看，对于气象雷达探测而言，对应水循环各个环节均有作为；水从江河湖海蒸发过程，形成气象万千最重要的要素——水汽；再由水汽抬升凝结形成云，进一步发展致雨；所以不仅要能够揭示云的发展与演变，还要解释其内部的微物理特性与动力结构特性。同时还要对进一步发展的云产生的雨、冰雹、雪等降水系统进行探测，不仅有气态、液态，还有固态。

弥散气象目标特性，还可以从天气系统发展各个阶段看，不可能仅凭靠雷达硬件技术就能完全解决问题；有了好的雷达硬件技术，还必须配有好的观测方法，针对天气系统在不同阶段特点，建立起有针对性雷达扫描策略和观测方法，才能有效地发挥雷达的作

收稿日期：2022年9月15日；修回日期：2022年9月29日

作者：李柏，Email: libai@cma.gov.cn

用。例如天气系统初期发展弱回波探测问题，低空覆盖问题，困扰我们的脉冲多普勒体制造成的距离速度模糊问题都必须通过有效观测方法来解决。天气系统发展的不同阶段，应当建立有针对性的扫描策略与观测模式。

最后，对弥散气象目标特征，还应当从空间布局看，一部雷达无论是探测范围和探测有效性，都受到其自身的限制和环境的限制，组网协同观测技术，不仅能够利用雷达本身高时空分辨率优势获得有限范围内的中小尺度天气系统的高时空分辨率精细化结构特性；同时还能够通过组网获得大尺度天气系统的更广大范围的结构特征和演变特性，为我们从整体与局部上综合掌握天气系统结构及演变提供了技术途径。因此，综合分析可以概括出弥散气象目标具有的主要特征。

1) 气象弥散目标不是“刚体”，其外形时刻都在发生变化；它对电磁波散射特性，没有固定不变的物理属性，而且不同相态特征的弥散气象目标的介电特性也不同。

2) 气象弥散目标其散射特性是由充塞在雷达波束采样空间的降水粒子、冰雹粒子、云滴粒子、冰晶粒子和气溶胶粒子等所决定，其散射特性与上述粒子相态紧密相关，并且其散射特性由采样波束空间的多种粒子对电磁波散射的共同作用所决定，而且这一特性只具有统计特性。

3) 气象弥散目标的粒径尺度跨越幅度十分大，可以从几十微米到十几厘米不等，甚至更大的尺度跨越；且不同尺度粒子均具有三态特征，即液态、气态和固态。不同粒径的粒子和不同相态粒子在同一采样空间对统计特性的贡献不同，大粒径的粒子贡献远大于小粒径的粒子贡献。

4) 弥散目标的散射特性，与采样的样本累计数密切相关，并且与独立采样时间的长短紧密相关；采样样本累计数少，采样时间短则弥散目标的测量精度不高，稳定性差；然而，当采样累计时间过长，又难以保证采样的独立性；因此，采用时间长短取决于构成弥散目标。

5) 弥散气象目标在降水云系中粒子的增长过程存在慢过程与快过程。在降水云系的中下部暖云降水区液态雨滴以碰并增长形式增长，属于慢过程；而在中高层-20℃以上高度层，冰晶与过冷却液态共存区，降水粒子的增长，即贝吉隆增长过程则属于快增长过程；这些增长过程的不同对于雷达采样的统计特性将产生较大影响。

### 1.3 气象弥散目标的聚集性

气象弥散目标在天气系统发展的各个阶段，均表现出具有聚集特性，即：尺度、相态、形状和密度度相类似的弥散目标，在不同阶段会聚集在一个相对集中的空间里。

这既是同一属性特征的粒子具有的群聚特性；而决定粒子同一属性群聚的主要影响因子有：粒子大小（重力）、粒子形状、相态、水平与垂直风切变、上升运动。国外开展的双偏振雷达应用研究已经证明了群聚现象的存在。

美国国家大气研究中心（NCAR）利用双偏振雷达（NCAR POL）长期开展风暴云中的水凝物分类研究，研究结果表明：风暴云发展的不同阶段，均存在水凝物的聚集现象，即属性相接近的水凝物会分布在相对集中空间里的分布特征。如图1所示，NCAR POL 雷达2013年5月29日23:43 UTC，观测到的一个冰雹云实际水凝物的分布结构特征。从NCAR POL 雷达的RHI扫描图中可以清楚看到，以液态水形式分布包括：LD、DR、小到中雨（RA）和大雨（HR）分布区；以雨雹混合物形式分布包括：雨和冰雹混合（RH）分布区；以及其他形式分布包括：HA、霰（GR）、湿冰晶（WI）、干冰晶（DI）、不同取向的冰晶（CR）、DN、CL等。因此，对雷达采样而言，聚集区的时间尺度与空间尺度决定了雷达采样的统计特性；雷达采样只有具有足够的采样空间分辨率和时间分辨率，才能够把聚集区的粒子的统计特性揭示出来。所以，从某种意义上讲，聚集区特性决定了雷达采样特性。

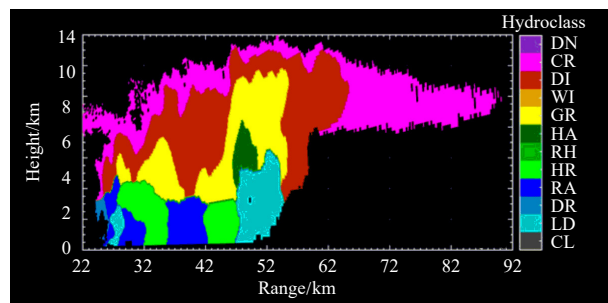


图1 2013年5月29日23:43 UTC NCAR双极化雷达观测冰雹云水凝物分类分布结构

弥散目标呈现聚集区现象在风暴云中的上升区域所表现出的聚集现象比较显著，而在下沉区各种承受不住托举力的粒子纷纷在重力作用下开始降落，所以下沉区的聚集现象呈现不同大小粒子混合聚集的现象。

从概括出的弥散气象目标特性可以看出，正因弥散气象目标特性缘故，给气象雷达采样提出了更高

的要求，不仅采样要有足够的样本，又必须足够快时间，同时采样空间应当有足够高的空间分辨率，以满足弥散气象目标采样的独立性和准确性。而多频段气象雷达是揭示这些复杂特性有效技术途经。

## 2 气象雷达波束宽度与弥散目标特性的关系

气象雷达波束宽度过宽，容易导致采样的弥散目标边界外延；过宽的波束，还会导致采样空间的散射特性严重偏离其固有的特性。这是因为弥散气象目标的特性只具有统计特性，采样空间的大小直接影响到这一统计特性。

因此，从弥散气象目标特征分析可以看出，气象雷达技术发展许多关键因子都取决于弥散气象目标的特征所决定的。这些关键因子包括：波长、脉宽、独立采样累积时间、波束垂直与水平宽度等。

### 2.1 气象雷达方程、雷达散射截面 (RCS) 与弥散气象目标的关系

气象雷达方程建立是气象雷达探测的重要理论基础，正是有了气象雷达方程这一理论基础，才把气象雷达与气象目标紧密的联系在了一起。因此，可以说气象雷达方程是架设在气象雷达与气象目标之间的一座桥梁，通过这座桥梁使得我们能够把气象雷达发射的电磁能量转换成对气象目标的量化测量的物理量，从而实现了利用气象雷达认知大气中各种天气现象的结构、特性、演变特征等重要信息。然而，无论是气象雷达方程还是雷达散射截面 (RCS) 都与一个重要物理量有着密切关系，这就是气象雷达发射的电磁波波长 ( $\lambda$ )。

气象雷达方程：

$$P_r = \left[ \frac{P_t G^2 \theta^2 H \pi^3 K^2 L}{1024 (\ln 2) \lambda^2} \right] \times \frac{Z}{R^2}, \quad (1)$$

其中： $Z = \sum_i^N n_i D_i$ 。

从气象雷达方程可以看出，在其他雷达参数不变情况下，雷达接收机接收到的平均回波功率与雷达波长成反比关系，即雷达波长越短所能够探测的弱信号能力越强。而实际大气中气象目标很多都属于弱信号目标，例如：毛毛雨、云、晴空回波等。因此，在同等雷达参数条件下，波长越短探测像云、晴空回波等这样弱信号气象目标的能力越强。因此，靠单一波长频段难以实现气象目标全部探测这一重要任务，必须通过多种频段气象雷达来完成。

另外，雷达探测理论中有一个重要概念，就是雷达散射截面 (RCS)。目标雷达散射截面面积的一些特性

可用一些简单的模型来描述，根据雷达波长与目标尺寸的相对关系，可分成三个区域来描述目标的雷达散射截面 (如图2所示)。

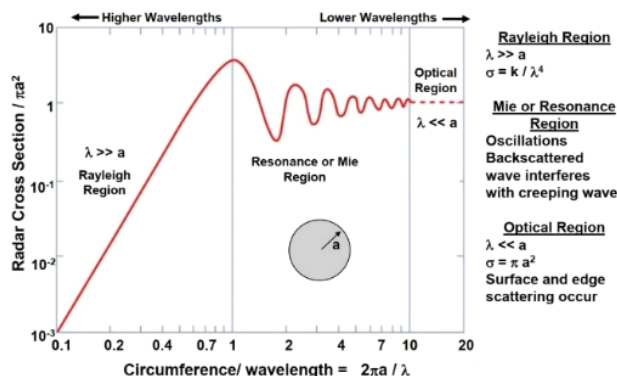


图2 波长与目标大小的散射对应关系

1) 瑞利区：在此区域，目标尺寸远小于信号波长，目标雷达散射截面与雷达观测角度关系不大，与雷达工作频率的4次方成正比。

2) 米散射区：在此区域，波长与目标尺寸相当。目标雷达散射截面随着频率变化而变化，变化范围可达10 dB；同时由于目标形状的不连续性，目标的雷达散射截面会随雷达观测角的变化而变化。

3) 光学区：在此区域，目标尺寸大于信号波长，下限值通常比瑞利区目标尺寸的上限值高一个数量级。简单形状目标的雷达散射截面可以接近它们的光截面，目标或雷达的移动会造成视线角的变化，将导致目标雷达散射截面发生变化。

雷达散射截面是一个虚拟的面积，用来定量表示粒子后向散射能力的强弱，在入射能流密度一定时，后向散射界面越大，粒子的后向散射能力越强，在相同条件下，产生的回波信号也越强。对于一个普通球形粒子，在瑞利散射条件下，其雷达散射截面为：

$$\sigma = \frac{64\pi^5 r^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} |K|^2, \quad (2)$$

其中： $|K|^2 = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ ， $|K|^2$ 为介电系数，是与材料复折射率相关的参数。这里简单地认为 $|K|^2$ 是无线电波在材料上的反射程度。

粒子的散射能力与粒子的大小、形状、电学特性有关。目前能对其散射做出精确解析解的只有少数几何形状比较特殊的粒子，如：圆球形、椭球形、圆柱形和扁平矩形。气象上的云滴、雨滴等粒子一般近似地为圆球形或椭球形，雪花可以近似为扁平矩形，冰晶近似为圆柱形。然而，考虑到粒子在下落过程中受到环境空气影响，下落姿态，也就是粒子下落过程的

取向也是影响雷达散射截面的重要因素之一。

此外，降水云系中的粒子随着相态的不同，其介电常数也存在很大差异。对于小水球的 $|K|^2$ 值为0.93左右，而小冰球的 $|K|^2$ 值为0.197，所以小冰球的后向散射截面大约只有同样大小的小水球的1/5。这也是目前业务在冬季开展雷达定量估测降雪时，造成降雪低估的主要原因。

从雷达散射截面定义可以看出：相同电学特性下，雷达散射截面与发射的电磁波波长的四次方成反比关系。这表明：同等信噪比条件下，波长越短其探测弱信号目标的能力越强。因此，能够利用激光雷达探测到纳米级的气溶胶粒子，利用毫米波长探测到几十微米到几百微米的云粒子。

最后，根据气象雷达方程中的反射率因子 $Z$ 的定义可以看出，作为气象雷达探测最重要的探测物理量反射率因子为：

$$Z = \sum_i^N n_i D_i^6 \quad (3)$$

气象目标物的粒径大小对反射率因子探测是一个极为敏感的量（如图3所示）， $Z$ 值与粒径大小的6次方成正比关系，当气象雷达进行探测采样时，同一采样空间里混合着不同粒径大小的气象目标，大粒子的后向散射能力远远大于小粒子的贡献。例如：1个3 mm直径的雨滴能够产生29 dBz的回波强度，而729个1 mm直径的小雨滴也能够产生29 dBz回波强度，可是将其转换成一小时雨强时，二者相差近达到10倍，由729个1 mm直径的小雨滴产生的1小时雨强远远大于前者。由此可以看出，气象雷达测量的物理因子中，单凭回波强度探测还不能够获得准确定量的降水信息，还必须通过其他技术途径获得降水粒子直径大小信息，才能够更准确地把握真实大气降水的特征。因此，气象雷达发展必须实现对粒径大小的探测，才能

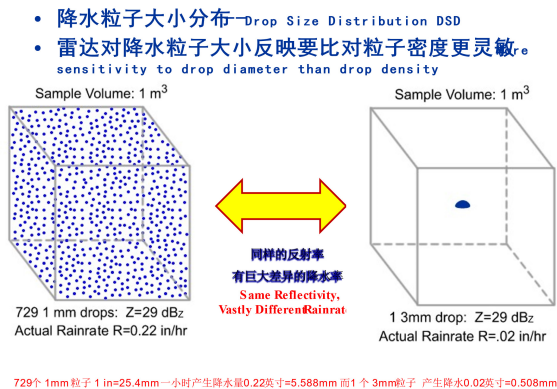


图3 反射率因子 $Z$ 值与降水粒子大小和数量关系

① 来源: <https://www.radartutorial.eu/15.weather/wr51.en.html>。

进一步推动雷达发展。

## 2.2 气象目标的散射特性与气象目标大小的关系

众所周知，气象雷达要想实现对气象目标物的准确测量，在气象目标物粒径大小与雷达波长对应关系问题上，必须满足瑞利散射条件，才能够实现其准确定量测量。这里最著名的案例就是美国在20世纪80年代设计、发展、建设起来的WSR-88D多普勒天气雷达网，在多普勒天气雷达设计之初，选择哪个频段（X波段、C波段，还是S波段）作为业务主要的雷达频段呢？通过大量仿真与实际观测验证，科学家发现，S波段频段除了具有非常良好的雨衰小的特点外，在实际大气的降水探测过程中，绝大多数情况下，S波段频段与被测气象目标之间均能够严格满足瑞利散射条件。

即：雨滴直径 $D \ll \lambda/16$ 。这是因为液态降水粒子在实际大气中既有碰并增长，同时还有不断的雨滴分裂破碎。研究与观测表明（如图4所示<sup>①</sup>）：大雨滴增长直径约为7 mm时，下落雨滴与环境空气之间会相互作用，雨滴逐渐由准圆形状，逐渐演变成平底椭圆形状。在大雨滴两侧高速绕流和顶托雨滴气流双重作用下，按照经典流体力学理论，流速大的地方压强小，流速小的地方压强大，雨滴两侧流速大压强小，而在雨滴底部流速小压强大，从而导致雨滴分裂破碎。液态状雨滴增长在实际大气中很少有超过7 mm直径存在的可能性。因此选用S波段频段，作为气象雷达测雨频段，实际应用过程遵从了瑞利散射的条件，从而为气象雷达定量估测降水奠定了坚实的理论基础。

综合弥散气象目标特性、气象雷达反射率因子的

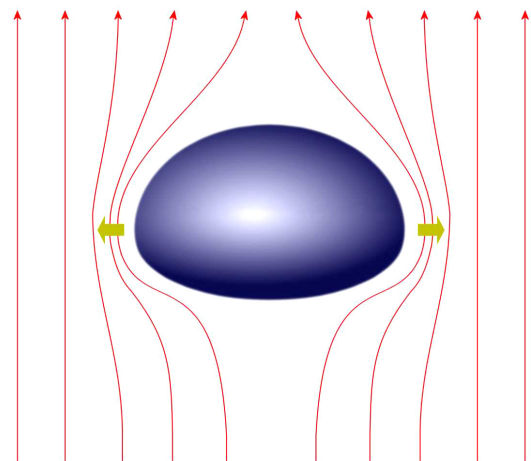


图4 下落的雨滴取代了空气，在它的两侧，流线被压缩并产生拉力（类似于飞机机翼的空气动力学），这将把水滴拉得更宽；落差越大，压缩力和力就越强

特性,并结合气象雷达方程、雷达散射截面和瑞利散射理论的综合分析,可以看出要想利用气象雷达深入揭示出大气的重要特性和结构特征,发展多种频段气象雷达十分必要且重要。只有通过多种频段的综合探测才有可能获得从水汽、云和降水,到整个风暴的三维立体结构以及微物理过程。才能实现不同尺度大小弥散气象目标的准确有效的定量化测量。

通过上述综合分析,可以归纳出决定气象雷达技术发展有几个关键核心因素:

1) 一是气象雷达采用频段。不同波长的频段,在大气探测过程中它们的传播特性不同。例如衰减不同,对大气中的粒子产生的散射特性不同,有时候满足瑞利散射,有时候满足米散,有时候呈现光学特性。S波段气象雷达在大气探测中,它在实际大气降水过程中的衰减特性几乎可以忽略不计,此外其波长与降水粒子对应关系上,都严格遵从瑞利散射理论,这无疑对液态降水测量是非常有利的。这一优势,奠定了S波段可以作为气象雷达的其他频段的一个参照标准的地位,其重要性可以堪称大气探测领域的探空系统。另外,确定不同波长的同时,也确定了气象雷达最大采样空间分辨率的可能性。因为雷达波长与天线波束宽度形成的对应关系,决定了雷达天线的空间分辨率。

2) 二是大气中各种粒子与雷达波长构成雷达散射截面。对同一粒子不同波长探测时,其雷达散射截面不同。同一粒子对波长越短,产生的雷达散射截面反而越大。这促使了用很短波长探测更小粒子的可能性。

3) 三是气象雷达探测的核心物理量反射率因子Z与采样空间相同粒径大小的粒子直径6次方总和乘对应关系。因此决定了气象雷达不仅要了解单位采样空间里的粒子总数,还要获得其内的粒子直径谱特性,才能真正准确测量其反射率因子这一物理量,从而实现雷达测量降水的准确可靠。

### 3 小结与讨论

通过对弥散气象目标的特性分析,要推动我国气

象雷达技术的发展,不仅要发展雷达技术本身,同时也面临气象雷达对气象目标——“弥散目标”精细化、定量探测所要解决的“弥散气象目标”的特性理论研究问题。从上述分析中,弥散气象目标与气象雷达技术之间的关联可以概括如下:

1) 因弥散气象目标的粒子尺度跨越范围大,决定了多频段气象雷达对弥散气象目标的作用与监测能力。多波长气象雷达是获取降水云系“全物理图像”的重要技术途径。

2) 鉴于弥散气象目标仅具有统计特性,而这一统计特性又紧密的与其聚集特性相关。因此,聚集区的时间与空间尺度是气象雷达技术指标与性能的主要影响因素和设计的科学依据(包括:发射机功率、天线孔径、观测扫描策略与观测模式等)。

3) 弥散气象目标的大小与气象雷达波长之间的对应关系直接影响着散射特性和测量的准确性,粒子的相态也直接影响了气象目标的散射特性。随着双偏振雷达业务应用,利用偏振量开展粒子大小与相态识别是提高准确测量重要途径。

4) 弥散气象目标的散射特性由于受到粒子本身因素(大小、相态、形状、密实度、介电特性等)的影响,同时也受粒子浓度、环境风场(切变)等影响。利用现代技术手段建立仿真数学模型,开展弥散气象目标散射特性的仿真研究是一个深入研究弥散气象目标特性的重要技术途径,并结合各种技术渠道的直接对云和降水微物理特征采样与雷达观测的对比分析。

现代气象雷达随着电子技术、材料技术、计算机技术,芯片技术的快速发展,气象雷达在硬件设备方面发展十分迅速,组成气象雷达各个分系统的设备也高度集成化、模块化,使得气象雷达在硬件设备方面的发展呈现加速发展趋势。然而,制约气象雷达发展的重要因素在于气象雷达的信号处理,而气象信号的处理的关键在于我们对弥散气象目标特性的认知。因此,该是我们认真思考、深入研究制约气象雷达发展最核心的关键因素——弥散气象目标特性这一关键问题的时候了。