

胡树贞,王志成,张雪芬,等,2022.毫米波雷达海雾回波特征分析及能见度反演[J].气象,48(10):1270-1280. Hu S Z, Wang Z C, Zhang X F, et al, 2022. Analysis of sea fog echo characteristics and visibility inversion of millimeter-wave radar[J]. Meteor Mon, 48(10):1270-1280(in Chinese).

毫米波雷达海雾回波特征分析及能见度反演^{*}

胡树贞¹ 王志成^{1,2} 张雪芬¹ 陶 法¹ 丁虹鑫³ 李翠娜¹

1 中国气象局气象探测中心,北京 100081

2 成都信息工程大学,成都 610200

3 成都远望探测技术有限公司,成都 610299

提 要: 利用 Ka 波段扫描式毫米波雷达和自动气象站资料,在福建平潭沿海开展海雾遥感观测试验。对 2020 年 5 月至 2021 年 3 月试验期间发生的 6 次海雾过程进行特征分析,并基于毫米波雷达开展了雾区能见度反演。结果表明:毫米波雷达可以有效探测海雾的水平分布和垂直结构,可用于监测海雾的生消演变;在海雾发展旺盛阶段,毫米波雷达反射率因子显示从雾层顶部延伸到地表的丝缕状强回波结构;海雾的雷达反射率因子与前向散射能见度呈负相关,但针对每个海雾过程,二者之间并不遵循明确的通用方程;海雾的雷达反射率因子集中在 $-30\sim-10$ dBz,频率直方图符合正态分布,雾区回波整体上表现为均匀特征,在雾的生成阶段和消散阶段反射率因子动态范围大,但在持续阶段动态范围小;毫米波雷达反演能见度与前向散射能见度具有较为一致的波动起伏,能够反映雾区能见度变化,但不同的海雾过程呈现出不同的差异。

关键词: 海雾,前向散射能见度,毫米波雷达,遥感

中图分类号: P426, P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.042601

Analysis of Sea Fog Echo Characteristics and Visibility Inversion of Millimeter-Wave Radar

HU Shuzhen¹ WANG Zhicheng^{1,2} ZHANG Xuefen¹ TAO Fa¹ DING Hongxin³ LI Cuina¹

1 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

2 Chengdu University of Information Science and Technology, Chengdu 610200

3 Chengdu Yuanwang Detection Technology Co. Ltd, Chengdu 610299

Abstract: Based on the observation data of Ka band scanning millimeter-wave radar and automatic weather station, the sea fog remote sensing experiment was carried out in coastal area of Pingtan, Fujian Province. The characteristics of six sea fog processes that occurred from May 2020 to March 2021 were analyzed, and visibility inversion in fog area was carried out based on millimeter-wave radar. The results showed that the millimeter-wave radar can effectively detect the horizontal distribution and vertical structure of sea fog, and can be used to monitor the evolution of sea fog. In the flourishing stage of sea fog, the reflectivity factor of millimeter-wave radar shows a strong filamile-like echo structure extending from the top of fog layer to the surface. The radar reflectivity factor of sea fog is negatively correlated with the forward-scatter visibility, but for each sea fog process, the relation between the radar reflectivity factor and the forward-scatter visibility does not follow a clear general equation. The radar reflectivity factor of sea fog is concentrated in the range from -30 dBz to -10 dBz, and the frequency histogram accords with normal distribution. The echo

^{*} 国家重点研发计划(2021YFC3090201,2018YFC1506401)共同资助

2021 年 11 月 10 日收稿; 2022 年 4 月 25 日收修定稿

第一作者:胡树贞,主要从事毫米波雷达资料分析及应用研究. E-mail:052310421hu@163.com

of fog area is uniform on the whole, but the dynamic range of reflectivity factor is large in fog generation and dissipation stage, while the dynamic range is small in fog persistence stage. The retrieved visibility by millimeter-wave radar and the forward-scatter visibility have relatively consistent fluctuations, which could reflect the change of visibility in fog area, but different cases present different features.

Key words: sea fog, forward-scatter visibility, millimeter-wave radar, remote sensing

引 言

海雾发生时使得海上及沿海地区大气的水平和垂直能见度迅速降低,是造成海难事故的主要因素之一,对从事海上生产经营活动人员的威胁很大(黄彬等,2014)。传统以自动气象站为主要手段开展海雾观测,受地理条件和设备性能等方面限制,无法在海面上大范围布设,且单点观测设备取样空间小,对于分布广、空间差异大、生消快的海雾观测存在较大的不确定性,无法准确获取大面积海雾的发展过程及内部结构。国内外专家学者尝试利用卫星遥感资料,综合运用光谱分析法、结构分析法等技术,分析卫星各通道光谱特性,提取海雾在遥感资料中所反映出的特征差异,进而进行海雾监测及应用,取得了比较好的应用效果(吴晓京等,2005;肖艳芳等,2017;卢乃锰等,2017;张春桂和林炳青,2018;王清平等,2021;张伟等,2021)。但卫星监测海雾面临以下问题:一是受上层云系干扰,不能全天候实时观测,影响了其效益发挥;二是受时空分辨率限制,只能对持续时间较长并具有一定覆盖范围的海雾进行定量监测,但针对不易被卫星捕捉的突发性和局地性海雾天气的服务需求更为迫切。

随着地基遥感观测技术的发展,借鉴气象雷达在云和降水监测方面的应用(杨磊等,2019;杨通晓和岳彩军,2019;胡树贞等,2020),专家学者希望用波长相对较短的毫米波雷达开展海雾观测。相对于厘米波雷达,毫米波雷达的波长短,对云雾粒子灵敏度更高,且具有较强的穿透能力,使其用于监测海雾成为可能。Gultepe et al(2009)通过模拟仿真建立了大气能见度与毫米波雷达观测之间的物理模型,并在随后的观测试验中得到了验证;Hamazu et al(2003)利用磁控管技术体制设计和组装了一套发射功率达 100 kW 的 35 GHz 扫描式多普勒雷达,成功观测到了海雾的反射率和速度的三维结构,证实海雾反射率存在非均匀结构,并进行了成因分析;

Boers et al(2013)分析了辐射雾中地面能见度与毫米波雷达反射率之间的关系,并用扫描迁移率粒径谱仪(SMPS)开发了一套液滴活化模型,用于分析雾滴光谱特性,指出雾中的化学成分对能见度和雷达反射率之间的关系有重要影响;Uematsu et al(2005)利用毫米波雷达对海雾的空间分布、强度和生消特征进行观测试验,并对回波中呈现出的胞状结构进行细致分析。国内也有专家学者尝试开展了基于毫米波雷达的海雾观测试验,刘光普等(2019)分析了毫米波雷达反射率因子与能见度之间的关系,指出二者之间更符合指数关系;岑炬辉等(2021)利用毫米波雷达对降水-雾过程进行了特征分析,根据经验公式较好地模拟了一个过程中雷达反射率因子与地面能见度之间的关系;胡利军等(2021)和张晶晶等(2020),利用 33.44 GHz 全固态毫米波雷达在宁波沿海港口开展了海雾探测,并开展了非降水海雾过程和降水海雾过程特征分析,取得了较好的观测效果。

本文利用 Ka 波段扫描式毫米波雷达和自动气象站观测资料,在福建沿海连续开展海雾遥感观测试验,成功观测到多个海雾过程,对海雾过程中毫米波雷达探测数据进行分析,以期获得海雾回波的变化特征,并尝试开展了基于毫米波雷达的雾区能见度反演。

1 基本理论与试验简介

1.1 基本理论

气象学和环境学领域,将悬浮有大量固液态微粒的大气称为气溶胶大气,气溶胶能够吸收和散射光辐射,会造成光辐射在原传输方向上衰减,显著降低大气能见度。通常情况下,气溶胶散射系数可写成以下形式:

$$\alpha = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K(r) N(r) \pi r^2 dr \quad (1)$$

式中: α 为立体散射系数; $r_{\min}$ 和 $r_{\max}$ 分别为气溶胶微粒最小和最大半径; $K(r)$ 为散射效率因子; $N(r)$ 为半径为 r 的微粒密度计数。

雷达将单位体积内云、雨、雾等水凝物粒子直径六次方的总和定义为气象目标的回波强度, 当毫米波雷达平扫只用于低层雾的观测时, 则雷达回波强度反映的全部是雾滴谱的信息, 公式如下:

$$Z = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) D^6 dD \quad (2)$$

式中: Z 为雷达回波强度; $D_{\min}$ 和 $D_{\max}$ 分别为雾滴最小和最大直径; $N(D)$ 为直径为 D 的雾滴密度计数。

当雾发生时, 雾滴是最主要的气溶胶微粒。从式(1)和式(2)可以看出, 雾滴谱的浓度和大小直接影响能见度与雷达回波强度大小。

1.2 观测试验

从 2020 年 5 月开始, 中国气象局气象探测中心在福建平潭海洋气象观测试验基地(以下简称海洋基地)安装 1 套扫描式毫米波雷达, 结合周边区域自动气象观测站, 开展海雾遥感观测试验。其中, 扫描式毫米波雷达采用全固态发射机, 利用脉冲压缩、多普勒和双偏振技术, 以及机械扫描方式, 实现俯仰 $-2^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 、方位 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 立体扫描, 利用水凝物对电磁波的散射作用, 获取云、雨和雾等气象目标物的回波强度、径向速度、速度谱宽以及空间位置信息, 毫米波雷达参数见表 1 所示。

表 1 毫米波雷达主要系统参数

Table 1 Main parameters of millimeter-wave radar		
系统	参数	指标
天线	直径/m	1.8
	增益/dB	53
	波束宽度/ $^{\circ}$	0.39
	工作模式	单发双收
发射机	频段	35 GHz $\pm$ 100 MHz
	峰值功率/W	130
	脉冲宽度/ μ s	1.5、20
	脉冲重复频率/Hz	1 000~10 000
接收机	线性动态范围/dB	80
	噪声系数/dB	5.2
	增益/dB	37.2
终端产品	反射率因子/dBz	$-50 \sim 40$
	径向速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$-17 \sim 17$
	速度谱宽/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$0 \sim 8$
	线性退偏振比/dB	$-30 \sim 5$

毫米波雷达采用宽、中、窄脉冲交替发射技术体制, 有效解决了距离分辨率和近距离盲区等问题。其中, 窄脉冲为 $1 \mu\text{s}$, 实现 $0.15 \sim 1.00 \text{ km}$ 范围探测; 中脉宽为 $5 \mu\text{s}$, 实现 $1.0 \sim 3.9 \text{ km}$ 范围探测; 宽脉冲为 $20 \mu\text{s}$, 实现 3.9 km 以外距离处的回波探测。图 1 为利用 2021 年 3 月观测数据得到的毫米波雷达在不同距离处探测能力, 可见在窄脉冲工作模式时, 该雷达在 1 km 处可探测最小反射率因子达到 -50 dBz , 在中、宽脉冲工作模式时, $1 \sim 10 \text{ km}$ 范围内雷达可探测最小反射率因子 $\leq -30 \text{ dBz}$, 该雷达的探测性能满足对海雾的探测需求。

毫米波雷达采用平面位置显示(PPI)和距离高度显示(RHI)两种扫描方式, 每个周期包括 1 个方位 RHI 和 2 个仰角 PPI 扫描, 根据不同参数设置整个扫描周期约 $8 \sim 12 \text{ min}$ 。其中, PPI 以 0.5° 、 1° 或 1.5° 中的任意 2 个或全部仰角进行方位 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 扫描; RHI 扫描的方位角为 120° , 仰角为 $-2^{\circ} \sim 15^{\circ}$, 可实现海平面到雾顶全程观测。由于毫米波雷达安装场平地海拔高度为 23.5 m , 扫描过程受地物遮挡严重, 本试验中可用的 PPI 扫描方位角为 $20^{\circ} \sim 230^{\circ}$, 该区域绝大部分为海面, 以 PPI 按照 1° 仰角扫描为例, 考虑雷达波束宽度和安装海拔高度, 距离雷达 1 km 处探测回波距海平面最低高度约为 40 m , 5 km 处高度为 93 m , 10 km 处高度为 163 m , 均在绝大多数海雾的发展高度以下。在毫米波雷达扫描范围内共有 4 个自动气象观测站安装有前向散射(以下简称前散)能见度仪, 按照距离由近到远分别为海洋基地、流水码头、海峡号码头和澳底村站。其中, 海洋基地站的毫米波雷达与前散能见度仪为同址观测。毫米波雷达有效扫描区域和前散能见度仪分布位置如图 2 所示。

1.3 数据资料

观测试验期间, 毫米波雷达共观测到 6 次较为典型的海雾过程。其中, 2 次过程为雾转雨过程, 其余为纯雾过程, 具体过程简介见表 2 所示。表中所列自动站要素均为海洋基地站观测数据。按照地面观测规范对雾的等级划分, 6 个个例过程以轻雾为主, 中间夹杂雾和大雾天气过程, 观测个例过程能够代表福建东部沿海地区的海雾特征。

需要说明的是, 本文所用毫米波雷达 PPI 扫描数据以 1° 仰角为主, 当没有 1° 仰角数据时, 优先选

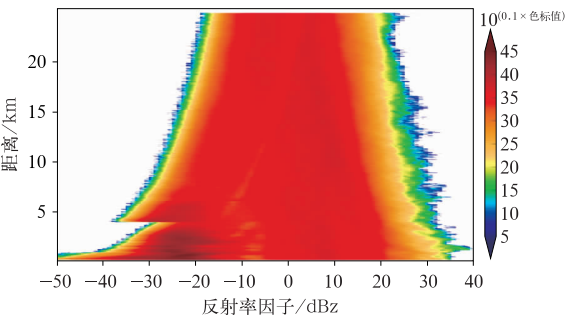


图 1 利用 2021 年 3 月观测数据得到的毫米波雷达不同距离处探测能力
(填色:回波出现的个数)

Fig. 1 Detection of millimeter-wave radar at different distances obtained by the radar data of March 2021
(colored: number of echoes)

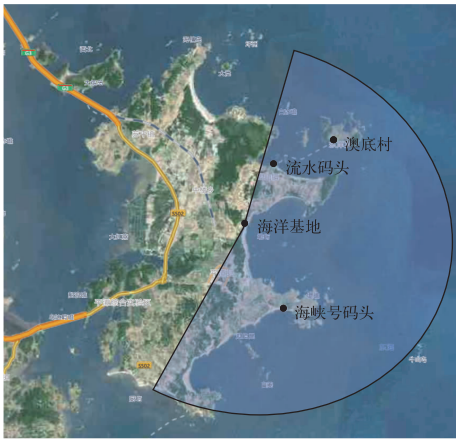


图 2 毫米波雷达扫描区域内能见度站分布

Fig. 2 Distribution of visibility stations within millimeter-wave radar scanning zone

表 2 试验期间海雾观测个例

Table 2 Sea fog observation cases during the experiment

个例序号	日期/年月日	时段/BT	平均能见度/m	最低能见度/m	平均风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均风向/($^{\circ}$)	备注
1	20200506	02:57—09:09	4082	1619	2.3	238	
2	20210122	18:17—23:14	3899	829	6.4	24	雾转雨过程
3	20210206	16:15—22:50	1940	391	4.8	35	
4	20210317	00:05—05:18	3548	2281	8.4	29	
5	20210317	16:45—19:22	3605	2789	7.6	37	雾转雨过程
6	20210319—20210320	18:52—09:34	1612	259	1.3	104	

用 0.5° 仰角数据。4 个自动气象观测站数据频次为 $5 \text{ min} \cdot \text{次}^{-1}$ 。

2 毫米波雷达海雾回波特征分析

2.1 个例分析

选取表 2 中个例 3 和个例 4 过程进行分析,图 3 为毫米波雷达扫描区域内 4 个自动气象站对应观测的上述两个个例过程前散能见度和相对湿度数据曲线。从图中可以看出,在两个个例过程期间,所有站点前散能见度下降的同时均伴随着相对湿度的上升,最低能见度均在 3 km 以下,相对湿度维持在 95% 以上。与内陆辐射雾不同的是,两个过程期间海洋基地站地面平均风速分别为 $4.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $8.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,符合典型的海雾天气特征。两个过程相比,个例 3 过程前散能见度较低,各站前散能见度除在雾生成阶段快速降低外,其余时间段内起伏较缓慢,而个例 4 过程各站的前散能见度从凌晨开始

急剧下降,且在整个过程期间存在较大起伏,但整体维持在 5 km 以内,在 05:00 之后前散能见度在短时间内迅速上升,海雾过程结束。

为分析海雾过程期间毫米波雷达回波特征,图 4 和图 5 分别为两个过程期间毫米波雷达每隔一段时间获取的 PPI 和 RHI 扫描反射率因子分布。针对个例 3 过程,从图 4 的 PPI 扫描回波可以看出,毫米波雷达能够观测到大面积的海雾回波,最远回波距离达 13 km,在前期雾区回波较为均匀,没有明显纹理特征,而在 20:00 之后回波面积增大的同时,回波出现明显的不均匀波状特征。在垂直方向上,雾顶高度在 300 m 左右,最高时段可达 400 m。对图 5 所示的个例 4 过程进行分析,00:15 毫米波雷达在东部海面上开始观测到较为连片的弱回波信号,随后回波逐渐增强,面积同步增大,最远处回波距离可达 10 km 以上。在回波强度上此次海雾回波强度分布不均匀,有明显的波状结构,与前散能见度波动起伏相对应;在垂直方向上,雾顶高度呈现先升后降趋势,雾顶高度升高的同时伴随着回波面积

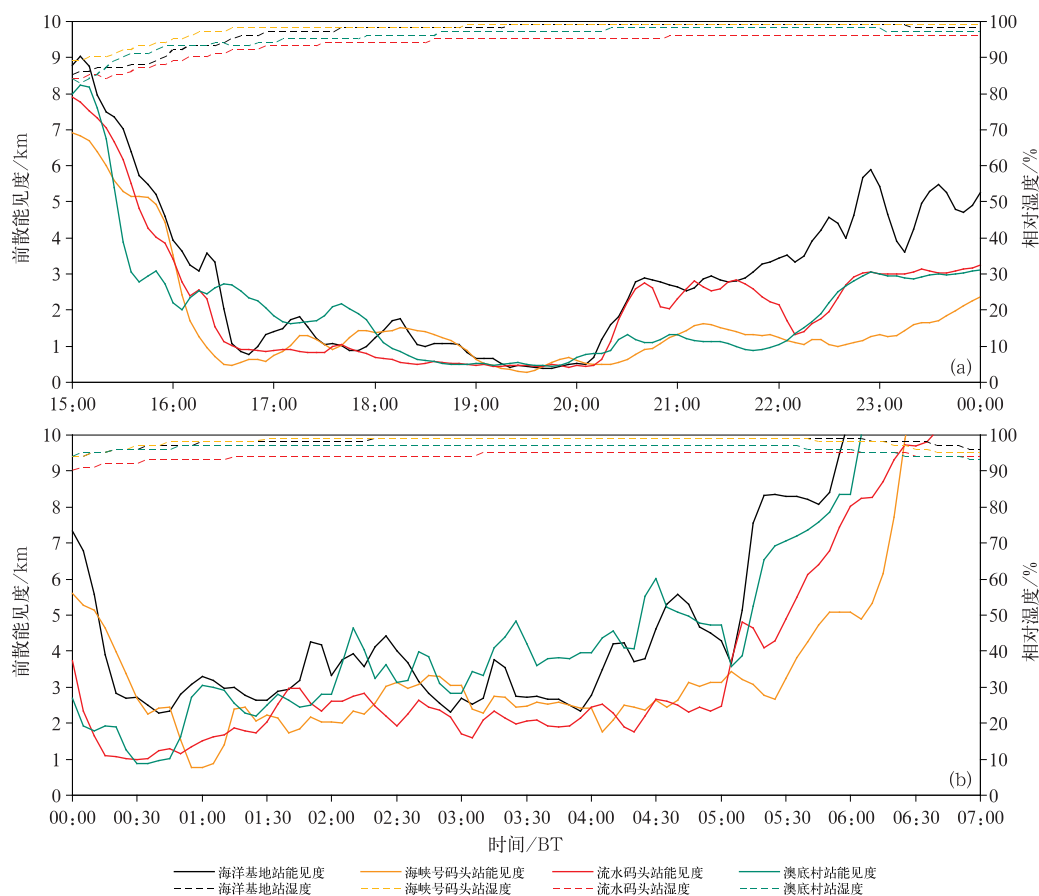


图 3 (a)个例 3 和(b)个例 4 过程各观测站前散能见度 and 相对湿度曲线

Fig. 3 Scatter visibility and relative humidity curves in front of all observation stations in (a) the Case 3 and (b) Case 4 processes

增大,整个过程期间雾顶高度在 300 m 左右。两个过程结合分析,在毫米波雷达 PPI 扫描反射率因子较强区域,在 RHI 扫描上表现为回波从高到低呈现明显的丝缕状回波,这可能与雾滴碰并增大下沉过程有关。对于垂直剖面上出现的丝缕状回波特征,Uematsu et al(2005)在对两次海雾过程分析时,认为是海雾旺盛阶段空气中存在细雨滴。另外,RHI 扫描回波在海雾边缘处迅速消失,符合海雾轮廓清晰的特征。毫米波雷达所测径向速度显示(图略),海雾移动方向与地面自动站所测风向一致,且在整个海雾过程期间未发生明显特征变化。

为了进一步分析毫米波雷达反射率因子与前散能见度之间的对应关系,以毫米波雷达安装点为中心,PPI 扫描 $60^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 夹角,0.3~1 km 探测距离范围内所有的反射率因子取均值,与海洋基地站对应时刻前散能见度做相关性分析。图 6 为上述两个过程反射率因子均值与前散能见度随时间变化曲

线,图 7 为二者之间相关性分析。需要说明的是:①前散能见度为单点原位测量,而对应的毫米波雷达反射率因子为一定区域面上的均值,因此图 6 和图 7 中二者数据进行了一定时间周期滑动平均处理;②由于二者观测频次不同,本文在数据处理时以毫米波雷达开始扫描时刻为基准,查找与该时刻最为接近的前散能见度观测数据与之匹配;③为便于分析,定义毫米波雷达反射率因子开始系统性上升到前散能见度达到一个相对平稳的低值区间为雾生成过程,毫米波雷达反射率因子开始系统性降低至回波消失区间为雾消散过程,生成和消散过程的中间时段为雾持续过程。

从图 6 中可知,毫米波雷达反射率因子与前散能见度之间呈现负相关,特别是在雾的生成和消散阶段,随着前散能见度的降低,反射率因子呈现出上升趋势,反之亦然。毫米波雷达反射率因子可以反映出回波区域能见度的变化趋势。另外,通过对两

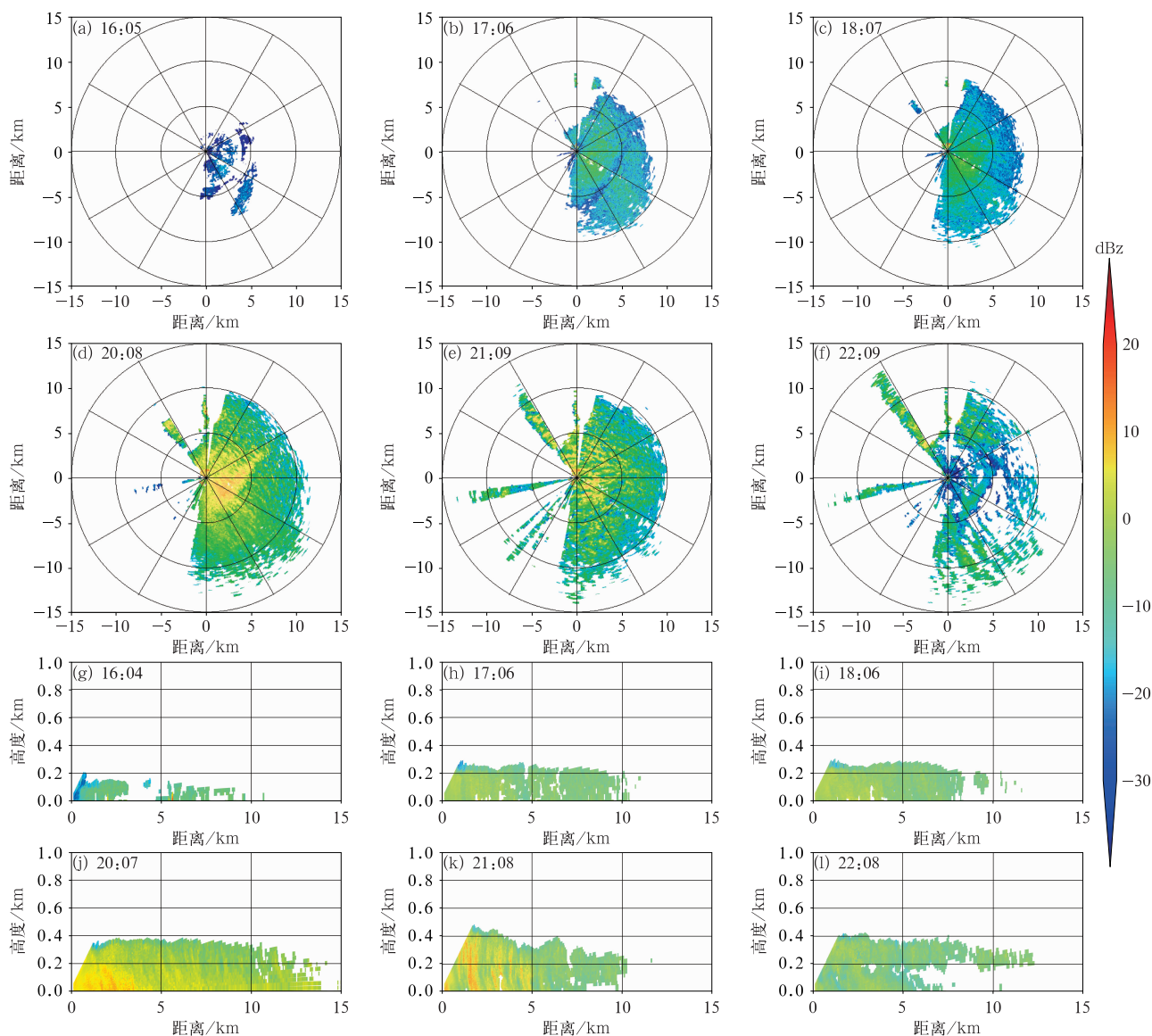


图 4 个例 3 过程毫米波雷达不同时刻反射率因子

(a~f) PPI, (g~l) RHI

Fig. 4 Millimeter-wave radar reflectivity factors at different times during the Case 3 process

(a-f) PPI, (g-l) RHI

个过程进一步分析,毫米波雷达反射率因子的变化趋势滞后于前散能见度,表现在海雾生成过程中前散能见度下降到一个相对稳定的低值后,毫米波雷达反射率因子并没有达到平稳,而是表现为继续上升,特别是个例 3 的整个过程滞后了约 40 min。从图 7 中可知,毫米波雷达反射率因子与前散能见度在雾的生成和消散阶段呈现较好的指数分布,但每个过程的方程参数有较大差别。而对于持续过程,反射率因子与前散能见度关系不明确,因此没有进行进一步的分析。特别指出的是,Boers et al(2013)在一个辐射雾过程的生成和消散阶段同样也观测到

了地面能见度与反射率因子之间呈现出不同的函数关系。较为合理的解释为,根据前散能见度仪观测原理,前散能见度仪对于雾滴谱的数浓度敏感,而通过雷达方程可知,毫米波雷达对雾滴谱直径更为敏感,其回波强度与滴谱粒子直径的六次方成正比。在雾生成阶段,特别是风速较大的海雾过程,较小的雾滴谱粒子由于重量轻,移动速度快,较先到达观测区域,被前散能见度仪所感知,随着雾滴谱数浓度增大,滴谱内部的碰并过程增强,使得雾滴谱粒子直径增大,毫米波雷达反射率因子上升。

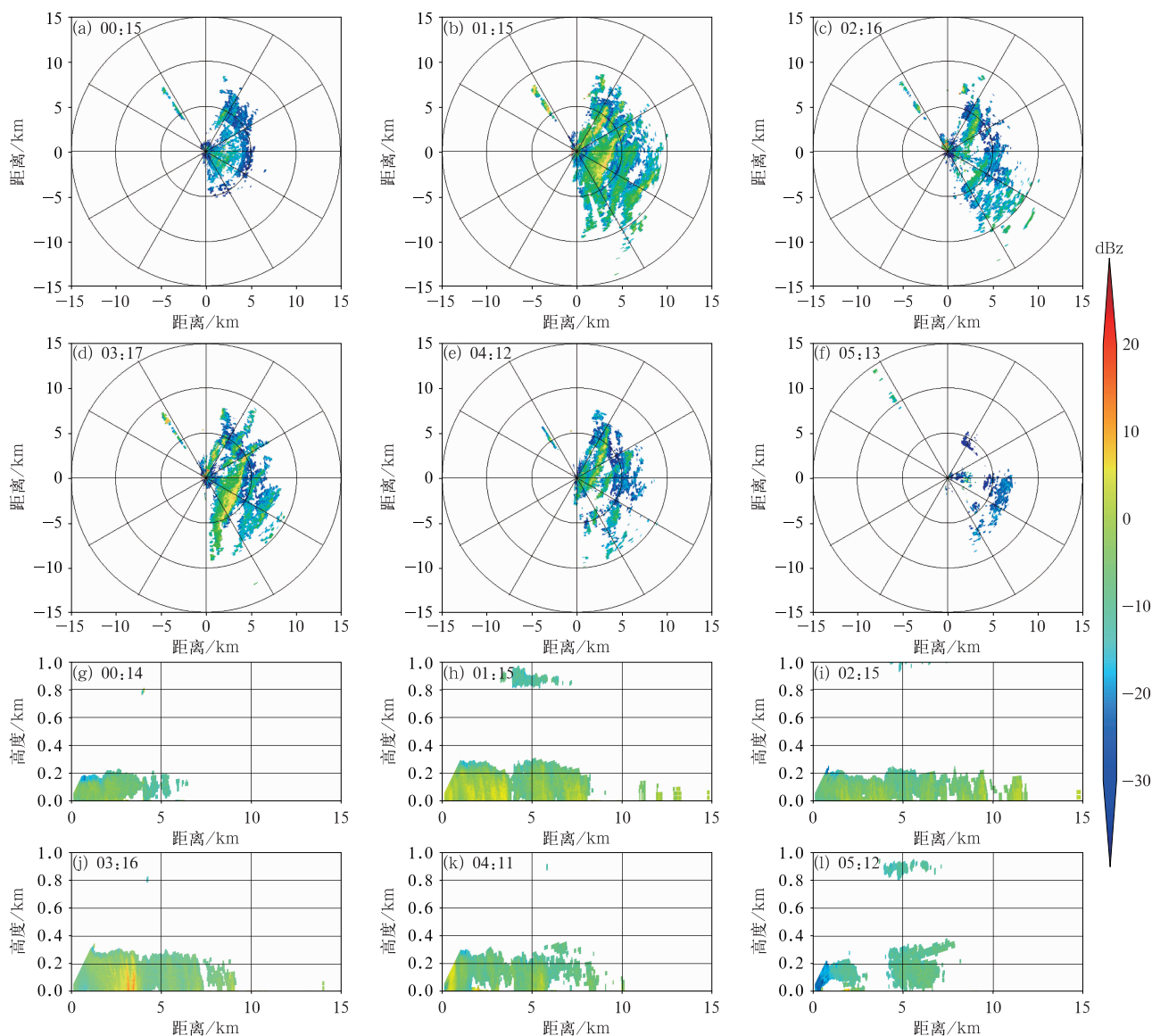


图 5 同图 4, 但为个例 4

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the Case 4 process

2.2 统计分析

为分析毫米波雷达海雾回波的普遍特征, 对表 2 中所列每个个例在整个海雾过程期间, 所有时段 PPI 扫描范围内回波反射率因子进行频率直方图统计分析(图 8), 常用统计量见表 3。由图 8 和表 3 可知, 毫米波雷达海雾回波的反射率因子符合正态分布, 众数及中位数二者接近, 海雾回波反射率因子主要集中在 $-30 \sim -10$ dBZ, 所有个例的第 25% 分位数与第 75% 分位数间隔仅为 5 dBZ 左右, 说明雾区回波整体上表现为均匀特征, 同时也说明在海雾持续阶段毫米波雷达反射率因子存在动态范

围过小的问题, 这会给后续雾区能见度反演造成困难。另外, 观察个例 3 和个例 6 频率直方图的右侧下降段, 反射率因子存在缓慢下降甚至凸起现象, 结合上节对个例 3 过程的特例分析, 该部分回波为雾区丝缕状结构的高值区, 一般发生在海雾浓度较大过程的中后期。所有海雾过程在 -35 dBZ 以下均存在一个小的回波凸起, 经查验分析为雷达观测的无效回波。

对表 2 中所列全部个例过程进行毫米波雷达反射率因子与前散能见度相关性分析(图 9)。图 9a 为按照上节提到的反射率因子均值取值方法得到的所有过程期间反射率因子与前散能见度散点图, 可

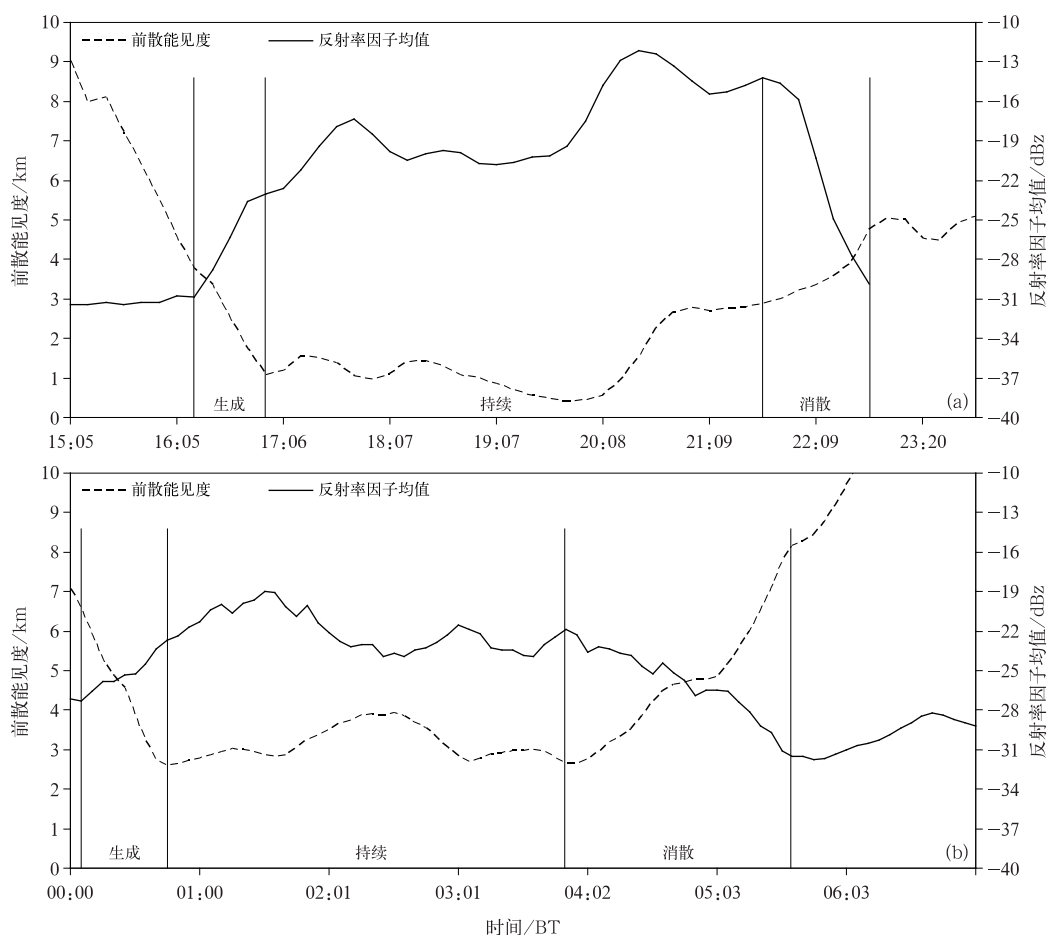


图 6 (a)个例 3 和(b)个例 4 过程毫米波雷达反射率因子均值与前散能见度对应曲线

Fig. 6 Corresponding curves of the mean reflectivity factor and the forward-scatter visibility in (a) the Case 3 and (b) Case 4 processes

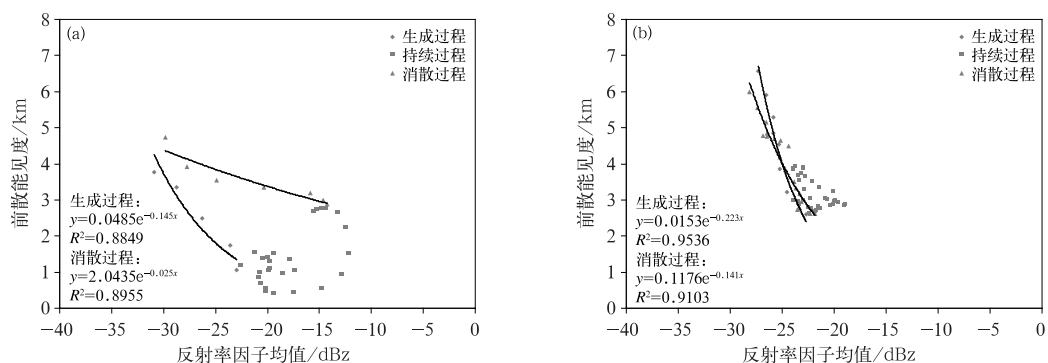


图 7 (a)个例 3 和(b)个例 4 过程毫米波雷达反射率因子均值与前散能见度相关性分析

Fig. 7 Analysis of the correlation between the mean reflectivity factor and the forward-scatter visibility in (a) the Case 3 and (b) Case 4 processes

知随着前散能见度降低,反射率因子有增大的趋势,但整体上较为离散。图 9b 为每个海雾个例过程中的生成过程和消散过程的反射率因子单独提取后与前散能见度的散点图及拟合方程,所有个例过程共有 6 个生成过程,4 个消散过程(个例 2 和个例 5 无

消散过程)。通过图 9b 可知,每个个例过程的生成过程和消散过程与前散能见度之间的相关趋势明显,但彼此每个过程存在较大差异,整体拟合呈现指数分布。

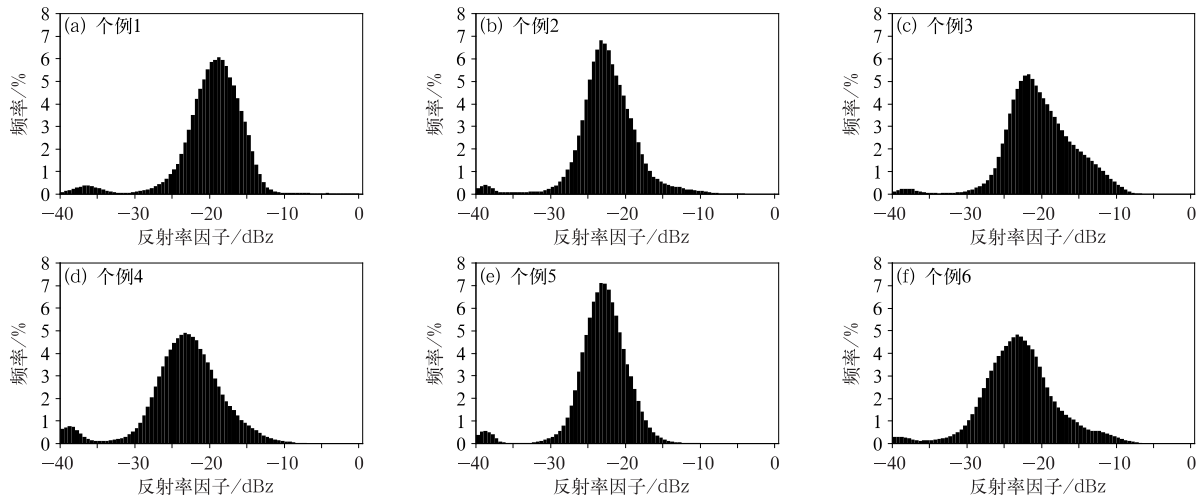


图 8 个例 1~6 过程毫米波雷达反射率因子频率直方图特征
Fig. 8 Frequency histogram characteristics of millimeter-wave radar reflectivity factor during the processes from Case 1 to Case 6

表 3 毫米波雷达反射率因子频率直方图常用统计量分析

Table 3 Analysis of common frequency histogram statistics of millimeter-wave radar reflectivity factors

个例序号	日期/年月日	众数/dBz	第 25%分位数/dBz	中位数/dBz	第 75%分位数/dBz
1	20200506	-19	-22	-19.5	-17.5
2	20210122	-23.5	-25	-23	-21
3	20210206	-22	-23.5	-21	-18
4	20210317	-23.5	-26.5	-23.5	-20.5
5	20210317	-23.5	-25.5	-23.5	-21.5
6	20210319—20210320	-23.5	-26.5	-23.5	-21

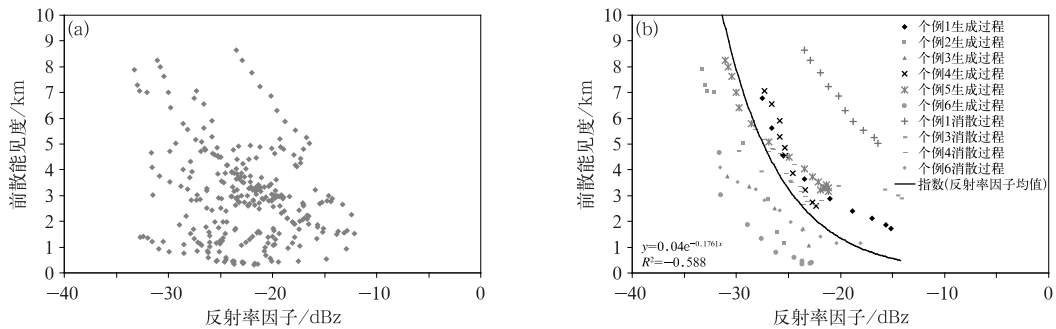


图 9 个例过程毫米波雷达反射率因子与前散能见度散点分布
(a)全部过程数据,(b)个例 1~6 生成过程和消散过程数据

Fig. 9 Scatter chart of millimeter-wave radar reflectivity factor and scatter visibility in the processes of all cases
(a) all process data from Case 1 to Case 6, (b) generation and dissipation process data from Case 1 to Case 6

对图 8 和图 9 进行综合分析,在海雾的生成阶段和消散阶段毫米波雷达反射率因子动态范围较大,而在持续阶段前散能见度变化较为敏感,此时毫米波雷达反射率因子变化范围有限。可解释为,在海雾的生成阶段,雾滴谱的数浓度和粒子半径均为单调增加,使得能见度降低的同时毫米波雷达有效

反射率因子由无到有迅速增强,而在消散阶段由于蒸发和风力作用,海雾开始消散,此时雾滴谱的数浓度和粒子半径呈现单调递减趋势,能见度升高的同时,毫米波雷达回波强度降低直至消失,相关解释后续还需借助雾滴谱仪进行进一步验证(张舒婷等, 2013)。

3 毫米波雷达反演能见度

通过上述对毫米波雷达海雾回波特征分析,毫米波雷达可以观测到扫描区域海雾的水平分布和垂直结构,反射率因子在一定程度上反映了雾区能见度的变化趋势。为了进一步量化毫米波雷达对雾区能见度的反演能力,利用图 9 中反射率因子与前散能见度之间的拟合方程,对表 2 所列个例过程进行能见度反演,结果见图 10 所示。

对图 10 进行分析,首先,毫米波雷达反演能见度与实测前散能见度具有较为一致的波动起伏,毫米波雷达反射率因子能够感知雾区能见度变化。个例 4 和个例 5 过程反演能见度与实测结果较为一致,其余过程毫米波雷达反演能见度与实测前散能见度具有一定的差异,表现为个例 1 至个例 3 的部分时段反演能见度高于实测能见度,而其余时段正好相反,说明海雾的生成和消散过程反射率因子与能见度之间具有异质性。对于个例 6 所代表的辐射雾,反演结果与实测之间差异明显,上述拟合方程明显不适用于该个例,根据已有研究,辐射雾的雾滴谱直径更小,而毫米波雷达相比雾滴谱的数浓度,对粒子半径更为敏感,导致毫米波雷达反射率因子值较小,反演能见度与实测前散能见度存在较大偏差。

4 结 论

通过对毫米波雷达海雾回波特征及反演能见度

进行分析,得出以下结论:

(1)毫米波雷达通过周期性 PPI 扫描和 RHI 扫描,可以获得海雾的水平分布和垂直结构信息,能够观测到海雾的消演变过程,为海雾发生区域的能见度反演提供了条件。

(2)在垂直方向上,在海雾发展旺盛阶段毫米波雷达反射率因子显示从雾层顶部延伸到地表的丝缕状强回波结构。

(3)海雾发生时,毫米波雷达反射率因子与前散能见度之间呈现负相关,特别是在海雾的生成和消散阶段。但针对每个海雾过程,前散能见度与毫米波雷达反射率因子之间并不遵循明确的通用方程。

(4)当毫米波雷达进行 PPI 低仰角扫描时,海雾回波的反射率因子符合正态分布,主要集中在 $-30 \sim -10$ dBz,所有海雾过程的第 25% 分位数至第 75% 分位数间隔仅有 5 dBz 左右,说明雾区回波整体上表现为均匀特征,在海雾的生成阶段和消散阶段毫米波雷达反射率因子动态范围较大,而持续阶段毫米波雷达反射率因子动态范围较窄,不利于雾区能见度反演。

(5)利用海雾生成过程和消散过程期间毫米波雷达反射率因子与前散能见度数据拟合,开展毫米波雷达雾区能见度反演,结果表明毫米波雷达反演能见度与实测前散能见度具有较为一致的波动起伏,能够反映雾区能见度变化特征,但不同的海雾过程表现出不同的差异,差异产生的原因需要进一步分析。

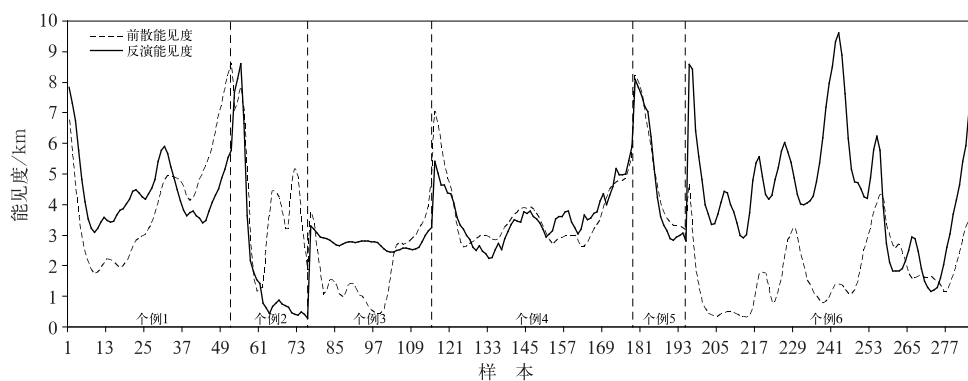


图 10 个例 1~6 过程毫米波雷达反演能见度与前散能见度折线图

Fig. 10 Broken line diagram of millimeter-wave radar inversion visibility and forward-scatter visibility in the processes from Case 1 to Case 6

参考文献

- 岑炬辉,唐世浩,胡利军,等,2021.降水-雾过程毫米波雷达探测分析[J].气象,47(2):205-215. Cen J H, Tang S H, Hu L J, et al, 2021. Analysis of a precipitation-fog process detected by millimeter-wave radar[J]. Meteor Mon, 47(2): 205-215 (in Chinese).
- 胡利军,杨豪,高爱臻,等,2021.宁波北仑港区一次航道海雾地基多源信息观测特征分析[J].气象科技,49(2):192-199. Hu L J, Yang H, Gao A Z, et al, 2021. Characteristic analysis of ground-based multi-source information observation of a sea fog process in waterway of Beilun Port, Ningbo[J]. Meteor Sci Technol, 49(2):192-199(in Chinese).
- 胡树贞,曹晓钟,陶法,等,2020.船载毫米波云雷达观测西太平洋云宏观特征对比分析[J].气象,46(6):745-752. Hu S Z, Cao X Z, Tao F, et al, 2020. Comparative analysis of cloud macro characteristics from two shipborne millimeter wave cloud radars in the West Pacific[J]. Meteor Mon, 46(6):745-752(in Chinese).
- 黄彬,王靖,陆雪,等,2014.黄渤海一次持续性大雾过程的边界层特征及生消机理分析[J].气象,40(11):1324-1337. Huang B, Wang Q, Lu X, et al, 2014. Mechanism of a sea fog event over Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Meteor Mon, 40(11):1324-1337 (in Chinese).
- 刘光普,黄思源,梁莺,等,2019.毫米波雷达在港口海雾观测和能见度反演中的应用[J].干旱气象,37(6):993-1004. Liu G P, Huang S Y, Liang Y, et al, 2019. Application of millimeter wave radar in harbor marine fog observation and visibility inversion[J]. J Arid Meteor, 37(6):993-1004(in Chinese).
- 卢乃锰,方翔,刘健,等,2017.气象卫星的云观测[J].气象,43(3):257-267. Lu N M, Fang X, Liu J, et al, 2017. Understanding clouds by meteorological satellite[J]. Meteor Mon, 43(3):257-267(in Chinese).
- 王清平,朱雯娜,王勇,等,2021. FY-4A 资料在乌鲁木齐机场浓雾天气监测中的初步应用[J].气象,47(5):627-637. Wang Q P, Zhu W N, Wang Y, et al, 2021. Preliminary application of FY-4A satellite data in dense fog weather events at Urumqi International Airport[J]. Meteor Mon, 47(5):627-637(in Chinese).
- 吴晓京,陈云浩,李三妹,2005.应用 MODIS 数据对新疆北部大雾地面能见度和微物理参数的反演[J].遥感学报,9(6):688-696. Wu X J, Chen Y H, Li S M, 2005. Utilizing MODIS data to retrieve the visibility and microphysical properties of fog happens in the northwest China[J]. J Remote Sens, 9(6): 688-696 (in Chinese).
- 肖艳芳,张杰,崔廷伟,等,2017.海雾卫星遥感监测研究进展[J].海洋科学,41(12):146-154. Xiao Y F, Zhang J, Cui T W, et al, 2017. Review of sea fog detection from satellite remote sensing data[J]. Mar Sci, 41(12):146-154(in Chinese).
- 杨磊,贺宏兵,杨波,等,2019.基于 S 波段双线偏振天气雷达的降水粒子相态识别[J].气象与环境学报,35(4):127-132. Yang L, He H B, Yang B, et al, 2019. Identification of hydrometeors based on S-band dual-polarimetric radar measurement[J]. J Meteor Environ, 35(4):127-132(in Chinese).
- 杨通晓,岳彩军,2019.基于支持向量机的双偏振雷达对流降水类型识别方法研究[J].暴雨灾害,38(4):297-302. Yang T X, Yue C J, 2019. Research on hydrometeor classification of convective weather based on SVM by dual linear polarization radar[J]. Torr Rain Dis, 38(4):297-302(in Chinese).
- 张春桂,林炳青,2018.基于 FY-2E 卫星数据的福建沿海海雾遥感监测[J].国土资源遥感,30(1):7-13. Zhang C G, Lin B Q, 2018. Application of FY-2E data to remote sensing monitoring of sea fog in Fujian Coastal Region[J]. Remote Sens Land Resour, 30(1):7-13(in Chinese).
- 张晶晶,吴福浪,俞科爱,等,2020.基于毫米波雷达的一次海雾过程特征分析[J].气象科技,48(3):406-414. Zhang J J, Wu F L, Yu K A, et al, 2020. Analysis of a sea fog process based on millimeter wave radar[J]. Meteor Sci Technol, 48(3):406-414(in Chinese).
- 张舒婷,牛生杰,赵丽娟,2013.一次南海海雾微物理结构个例分析[J].大气科学,37(3):552-562. Zhang S T, Niu S J, Zhao L J, 2013. The microphysical structure of fog droplets in a sea fog event in the South China Sea[J]. Chin J Atmos Sci, 37(3):552-562(in Chinese).
- 张伟,陈德花,胡雅君,等,2021.闽南沿海一次春季海雾过程微物理特征分析[J].气象,47(2):157-169. Zhang W, Chen D H, Hu Y J, et al, 2021. Microphysical structure analysis of a spring sea fog event in southern coastal area of Fujian[J]. Meteor Mon, 47(2):157-169(in Chinese).
- Boers R, Baltink H K, Hemink H J, et al, 2013. Ground-based observations and modeling of the visibility and radar reflectivity in a radiation fog layer[J]. J Atmos Oceanic Technol, 30(2):288-300.
- Gultepe I, Pearson G, Milbrandt J A, et al, 2009. The fog remote sensing and modeling field project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 90(3):341-360.
- Hamazu K, Hashiguchi H, Wakayama T, et al, 2003. A 35-GHz scanning Doppler radar for fog observations[J]. J Atmos Oceanic Technol, 20(7):972-986.
- Uematsu A, Hashiguchi H, Teshiba M, et al, 2005. Moving cellular structure of fog echoes obtained with a millimeter-wave scanning Doppler radar at Kushiro, Japan[J]. J Appl Meteor, 44(8):1260-1273.

(本文责编:王蕾)