

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).

## 降水-雾过程毫米波雷达探测分析<sup>\*</sup>

岑炬辉<sup>1</sup> 唐世浩<sup>2</sup> 胡利军<sup>1,3</sup> 涂小萍<sup>1</sup> 姚日升<sup>1,3</sup>

1 宁波市气象局,宁波 315012

2 国家卫星气象中心,北京 100081

3 浙江省气象信息中心,杭州 310017

**提 要:** 运用毫米波雷达探测对 2017 年 4 月 15 日夜间接造成低能见度天气的降水-雾过程进行了特征分析。水平分布特征分析得出该降水-雾过程空间尺度约为 15 km,雷达回波强度范围为  $-20 \sim 25$  dBz。对该过程的垂直结构进行分析后显示,此过程经过时,近地面经历了由降水到雾的一系列转变过程。对雷达径向速度的分析显示过程的主体结构较稳定,边缘区域对主体区域进行补偿,使过程维持发展。地面能见度观测站观测的能见度在过程接近时开始下降,并在过程即将离开时达到最低,在过程离开一段时间后能见度恢复,并且过程经过时在毫米波雷达扫描区域未观测到有效降水。根据经验公式较好地模拟了此过程中低空雷达反射率强度和近地面能见度之间的关系,具体公式为  $Vis = 2.283Z^{-0.121}$ 。

**关键词:** 毫米波雷达,降水-雾过程,雷达反射率,能见度

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.02.007

## Analysis of a Precipitation-Fog Process Detected by Millimeter-Wave Radar

CEN Juhui<sup>1</sup> TANG Shihao<sup>2</sup> HU Lijun<sup>1,3</sup> TU Xiaoping<sup>1</sup> YAO Risheng<sup>1,3</sup>

1 Ningbo Meteorological Bureau, Ningbo 315012

2 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

3 Zhejiang Meteorological Information and Network Centre, Hangzhou 310017

**Abstract:** The characteristics of a precipitation-fog process, which caused the occurrence of low visibility weather, were analyzed by using the imagery of millimeter-wave radar detection. The analysis of horizontal distribution characteristics of the process showed that its spatial scale was about 15 km, and the radar wave intensity ranged from  $-20$  dBz to 25 dBz. We also analyzed the vertical structure of the process, finding that the process experienced a series of varying processes from precipitation to fog as it passed through the radar-scanned region. The analysis of radar radial velocity suggests that the main structure of the system was stable, and the edge area was compensated for the main area, so that the system could maintain and develop. The visibility began to decline when the process was approaching the visibility stations, and reached the minimum value when the process was about to leave. The visibility became better after the process left for a period of time, and no effective precipitation was observed in the millimeter-wave radar scanning area during the process. In addition, according to the empirical formula, the relationship

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划(2018YFC1506502)、宁波市科技计划(202003N4194 和 2019C50004)及浙江省基础公益研究计划(LGF21D050003)共同资助

2019 年 7 月 1 日收稿; 2020 年 12 月 11 日收修定稿

第一作者:岑炬辉,主要从事微波遥感理论和应用研究. E-mail:289778982@qq.com

通讯作者:唐世浩,主要从事定量遥感理论和应用研究. E-mail:tangsh@cma.gov.cn

between low-level radar reflectivity intensity and near-surface visibility in this process was well simulated, and the specific formula was  $Vis = 2.283Z^{-0.121}$ .

**Key words:** millimeter-wave radar, precipitation-fog process, radar reflectivity, visibility

## 引 言

雾是指发生在低层大气的一种凝结现象,是悬浮于大气边界层中的大量水滴或冰晶,使大气水平能见度小于 1000 m 的危险性天气现象。海雾是指在海洋的影响下,在海上、岛屿或沿海地区形成的雾(王彬华,1983;周福等,2015)。统计研究表明,雾的类型、垂直结构及产生机理非常复杂,与辐射、天气过程、边界层结构、下垫面状况、气溶胶含量等都密切相关(郭丽君和郭学良,2016)。在 20 世纪早期的研究中,根据雾的形成机制和相关天气情况将其分为 11 类(Willett, 1928; Byers, 1959)。王彬华(1983)根据海雾的性质、出现海区和季节将其分为 4 类:平流雾、混合雾、辐射雾和地形雾。Tardif and Rasmussen(2007)分析纽约地区 20 年的历史资料,在分类条件中加入云底高度、云量和降水等信息,根据成因将雾分为 5 类。除了常见的辐射雾和平流雾外,还有降水雾、蒸发雾和云接地雾。降水雾通常具有云雾共存的结构特征,在层云接地过程中,云顶辐射降温引起云内不稳定,冷却的空气和水滴以湍流涡动的形式向下传输,云底之下蒸发的水汽在环境作用下冷却凝结导致层云接地(Oliver et al, 1978; Pilić et al, 1979)。研究显示,降水雾发生时通常会伴随着持续性的弱降水或者毛毛雨,使云底高度逐渐降低最终到达地面(Tardif and Rasmussen, 2008)。在弱降水之后,降水的蒸发加湿了低层大气并达到饱和状态,可能会产生浓雾(Westcott and Kristovich, 2009)。

海雾所造成的能见度降低会直接影响海上交通运输、捕捞、船舶进出港和沿岸地区的日常交通(张舒婷等,2013),还会加剧沿岸空气污染,危害人体健康,腐蚀建筑物,影响沿海农业生产,引发电网雾闪事件,引起供电中断,电力输送瘫痪等各种社会生产活动,是典型的自然灾害(Niu et al, 2010)。由于海雾物理机制和过程的复杂性,目前对海雾的认识还很不充分,预报准确率亟待提高(Lewis et al, 2004; Edson et al, 2007),因此对海雾的研究具有很高的理论和应用价值。

雾的结构不仅受局地气象要素变化的影响,还受平流、降水、低云和天气系统的影响(郭丽君和郭学良,2016)。传统的原位观测手段,是借助气象铁塔或系留气艇获取温湿廓线,以揭示产生雾的边界层结构(Fuzzi et al, 1992; 1998; 吴彬贵等, 2010)。运用原位观测方式进行雾的结构研究,因为时间分辨率和空间覆盖度的问题,很难直接获取雾的结构特征。近年来,随着遥感技术的不断进步,主动遥感设备也开始应用到雾的垂直结构研究中。通常情况下云雾粒子的半径不会超过  $20 \mu\text{m}$ ,传统的降水雷达(厘米波雷达)无法对此进行有效观测,毫米波雷达以对雾滴更敏感和大气衰减较弱这两个优势被用来对雾进行观测。雾对毫米波雷达信号的散射和吸收可以通过米散射理论进行计算(Li et al, 2014)。在美国等发达国家,毫米波云雷达技术已经较为成熟。Hamazu et al(2003)利用 35 GHz 雷达观测海雾,获得了雷达反射率因子的水平和垂直分布特征。Boers et al(2013)用 2011 年 10 月至 2012 年 3 月在荷兰进行的 35 GHz 毫米波雷达外场试验,对雷达反射率和能见度之间的关系进行了研究,并在雾的形成和蒸发阶段分别得到了不同的雷达反射率和能见度关系。Li et al(2017)对雷达反射率和能见度之间的多种算法进行了比较,并设计了一种新的能见度估算方法。在国内,毫米波雷达的发展起步较晚。2007 年中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室与中国航天研究院二院第二十三研究所联合研发出具有多普勒和极化功能的 8.6 mm 波雷达,并且于 2008 年 5—9 月成功进行了外场试验。数据分析表明,该雷达能够有效探测到层积云、高层云、台风外围深对流云等典型云系(刘黎平等, 2009)。此后,该雷达又为融化层亮带特征(王德旺等, 2012),冻雨降雪微物理和动力特征(王柳柳等, 2017),云中水成物分布特征(朱怡杰等, 2019)等方面的研究提供了帮助。2013 年安徽四创电子有限公司研制了一台 W 波段双极化云雷达,并进行了云物理参数的初步反演(吴举秀等, 2013)。近几年随着国内毫米波雷达技术的发展,船载(胡树贞等, 2020)和机载(张佃国等, 2020)毫米波雷达也开始运用于云的特征研究当中,同时云回波自动分类技术

(杨晓等,2019)也得到了一定发展。

目前,利用毫米波雷达对雾开展相关研究在国内刚刚起步,对于海雾尤其是降水雾的研究更是处于空白状态。本文运用 35 GHz 毫米波雷达探测和地面能见度观测相结合的方式,对 2017 年 4 月 15 日夜间造成低能见度的降水-雾过程特征进行相关研究,并对低空雷达反射率强度和近地面能见度之间的关系进行了讨论。

## 1 资 料

文中所用的资料主要包含两个部分:毫米波雷达资料和能见度观测站资料。

### 1.1 毫米波雷达

毫米波雷达布设在宁波臻德环保科技有限公司所属场地内,工作波段为 Ka 波段(33.44 GHz±10 MHz),具体参数见表 1。该雷达以固定天顶指向的时间高度显示(time height indicator, THI)、平扫显示(plan position indicator, PPI)和高扫显示(range height indicator, RHI)这三种探测显示方式对大气进行观测。利用雾滴、云滴、雨滴等液态水滴对电磁波的散射作用,对 15 km 径向范围内非降水云、雾和弱降水等进行观测,径向空间分辨率为 30 m,波束宽度为 0.44°,可实时获取探测范围内雾、云、雨的位置分布、强度、速度、速度谱宽等相关信息。毫米波雷达采用边界层模式和卷云模式(武静雅等,2016)进行分段式探测:探测距离在 1.8 km 以内采用的是 0.2 μs 脉冲宽度的边界层探测模式,该模式在距雷达 1.5 km 处探测能力为 -27 dBz;探测距离在 1.8 km 以外采用的是 12 μs 脉冲宽度的卷云探测模式,该模式在距雷达 5 km 处探测能力为 -36 dBz。

### 1.2 能见度观测站

毫米波雷达探测区域,共有 7 个能见度观测站(以下简称能见度站)。其中宁波地区有 3 个,分别为大猫岛站、凉帽山岛站和白鹅山礁站,这 3 个站点均为能见度观测专用站点;舟山地区 5 个,分别为定海站、金鸡山社区站(简称金鸡山站)、南海学校站、老鼠山屿站和岙山万向石油码头站(简称岙山万向站),这 5 个站点兼有自动气象要素观测。能见度站的地理位置和毫米波雷达的扫描区域详见图 1。

表 1 毫米波雷达主要性能参数

序号	指标名称	指标规格
1	雷达体制	脉冲多普勒、全相参、全固态、脉冲压缩
2	工作频率	33.44 GHz±10 MHz
3	峰值功率/W	200
4	探测范围	高度:0.12~15 km
		回波强度:-50~30 dBz
		±25 m·s <sup>-1</sup> (RHI)
		径向速度:±9.2 m·s <sup>-1</sup> (THI) ±4.5 m·s <sup>-1</sup> (PPI) 速度谱宽:≤8 m·s <sup>-1</sup>
5	空间分辨率/m	30
6	探测能力	≤-27 dBz@1.5 km、
		≤-36 dBz@5 km
7	脉冲宽度/μs	0.2、12
8	脉冲周期/μs	180、240
9	数据产品	回波强度、径向速度、速度谱宽、线性退极化
10	信号处理方法	脉冲压缩、快速傅里叶变换、相干积累、非相干积累等

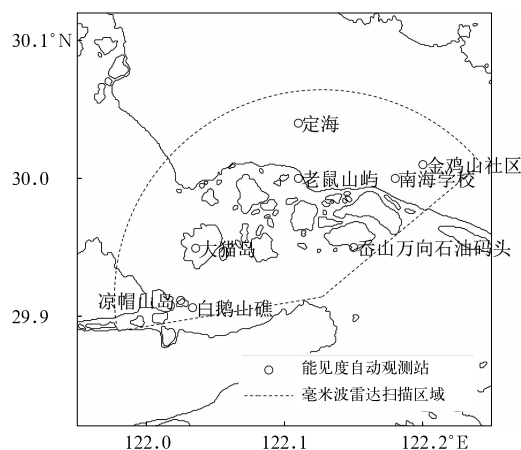


图 1 毫米波雷达扫描区域内能见度站分布  
Fig. 1 Distribution of visibility stations within the millimeter-wave radar scanning zone

## 2 资料分析

### 2.1 毫米波雷达对降水雾的观测

2017 年 4 月 15 日 22:56—23:50(北京时,下同),宁波东北部沿海海域发生了一次由小型降水过程引发的低能见度天气过程,过程中多个能见度站观测到了低于 1 000 m 的能见度值,其中个别站点观测到了能见度低于 200 m 的浓雾(能见度资料详见图 6)。毫米波雷达采用三种扫描方式,从不同角

度对这一过程的发展变化进行了探测,其结果为此次降水-雾过程的演变特征研究提供了基础。

### 2.1.1 降水-雾过程雷达回波强度的水平分布特征

#### 2.1.1.1 结构完整性判断

与测雨雷达相比,毫米波雷达最主要的问题就是降水对电磁波的衰减严重,以及探测水平范围较小。降水会对毫米波雷达信号造成非常严重的衰减,因此毫米波雷达一般只探测非降水云、毛毛雨、雾及沙尘暴(仲凌志等,2009)。由于文中所用数据未进行衰减订正,因而对于此次的过程,首先进行了观测结果结构完整性判断。

图 2 为 4 月 15 日 22:56—23:50 毫米波雷达所获取的 8 次 PPI 扫描图像,PPI 扫描仰角为  $3^{\circ}$ ,回波最远处垂直高度在 800 m 左右。降水-雾过程处于图 2b、2c 位置时,毫米波雷达位于过程的东北方向,因而此时对过程北部和东部边界的观测,不会出现衰减,同理从图 2f、2g 探测的南部和西部边界也不会出现衰减。图 2b 中凉帽山岛的扫描时间为 23:07,图 2e 中为 23:19,图 2f 中金鸡山的扫描时间为 23:38,从图 2b~2e 的过程移动速度来看,图 2f 中过程即为图 2e 中过程继续往东北方向移动所致。对比图 2d、2e、2f,可以看到雷达反射率强度分布结构也存在着很强的相似性,而三幅图像是雷达从不同方向对过程进行的扫描,说明了对过程的内部探测是完整的,不存在信号过度衰减的情况。据此分析得出该过程东西长约 18 km,南北宽约 12 km,毫米波雷达的探测完整覆盖了整个过程。

#### 2.1.1.2 水平分布特征

22:56—23:24(以下简称时段 1),毫米波雷达进行了 5 次 PPI 扫描,获取了从图 2a~2e 的 5 幅扫描图像。从图上依次可以看到过程从雷达扫描区域的西南方向进入,往东北方向移动,途径凉帽山岛站、白鹅山礁站和大猫岛站等站点。在此过程中,凉帽山岛站 5 次扫描均有雷达回波,白鹅山礁站 4 次扫描有雷达回波,大猫岛站 3 次扫描有雷达回波。23:33—23:50(以下简称时段 2),扫描获取了 3 幅 PPI 图像(图 2f~2h)。从图中可以看到此时过程已经离开西部的凉帽山岛站、白鹅山礁站和大猫岛站这 3 个站点,开始经过老鼠山屿站、南海学校站和金鸡山站这 3 个站点,并最终从东北方向离开雷达扫描区域。在这过程中,老鼠山屿站 1 次扫描有回波,南海学校站 2 次扫描有回波,金鸡山站 3 次扫描均有回波。其中,由于岙山万向站位置偏南,过程经过

此站点的时间跨越了两个时段,时段 1 的第五次扫描和时段 2 的第一、第二次扫描均有回波。

将图 2a~2h 结合起来可以看到,过程强回波中心分散在几片区域,强度在 20 dBz 左右,短时也有超过 25 dBz 的区域出现,过程绝大部分区域的回波强度 0 dBz 以上。从强回波中心往外,雷达反射率强度依次减弱,过程边缘区域雷达反射率强度约为  $-20$  dBz。

### 2.1.2 降水-雾过程雷达回波强度的垂直分布特征

23:24—23:38,为了对降水-雾过程的垂直结构进行探测,毫米波雷达切换到了 RHI 和 THI 扫描模式进行观测。

#### 2.1.2.1 垂直剖面特征

图 3 是 RHI 模式 4 次扫描得到的雷达回波图,其中图 3a、3b 两图是选择了方位角  $0^{\circ}$ (正北为  $0^{\circ}$ ,与风向定义一致,下同)进行垂直扫描,图 3c、3d 两图是选择了方位角  $300^{\circ}$ 进行垂直扫描。根据图 1 中过程的移动路径推断,在  $0^{\circ}$ 方位角进行的扫描穿过了过程的中心区域, $300^{\circ}$ 方位角进行的扫描位于过程后部接近边缘区域。

从对过程中心区域的扫描图上可以看到,反射率较强区域有三个,分别位于过程中部 6 km 高度附近、3 km 高度附近和过程前端区域。其中 6 km 附近区域和前端区域的雷达反射率强度在 15 dBz 左右,而在中心 3 km 附近区域的雷达反射率强度则是在 25 dBz 左右。研究表明,在冰晶、雪花下落过程中,通过  $0^{\circ}\text{C}$ 层后,表面开始融化,水凝体的融化及其引起的介电常数、粒子落速、粒子形状和尺寸以及浓度的变化等,使得雷达反射率迅速增大(李铁林等,2010;杨丹丹等,2010;孙晓光等,2011;王德旺等,2012)。因此,可以判断图 3a、3b 中 3 km 高度附近 25 dBz 左右的强回波区域为水凝体的融化区域,同时也可得出此区域正在发生降水。对比图 3a、3b 可以看到,图 3a 在中心区域 6 和 3 km 高度的两个强回波中心之间存在很强的连续性,此时该区域应为连续性降水,图 3b 两者之间出现了一条在 0 dBz 左右的分离带,融化区域也很分散,此时该区域应为零星降水。

对过程后部的扫描图像中,图 3c 是分为近地面和 6 km 高度附近两个强回波区域,图 3d 只有 6 km 高度附近一个强回波区域。从图 3c 可以看到,两个强回波区域之间出现了大片的  $-15$  dBz 左右强度的弱回波区域,表明此时两个强回波区域已经趋向

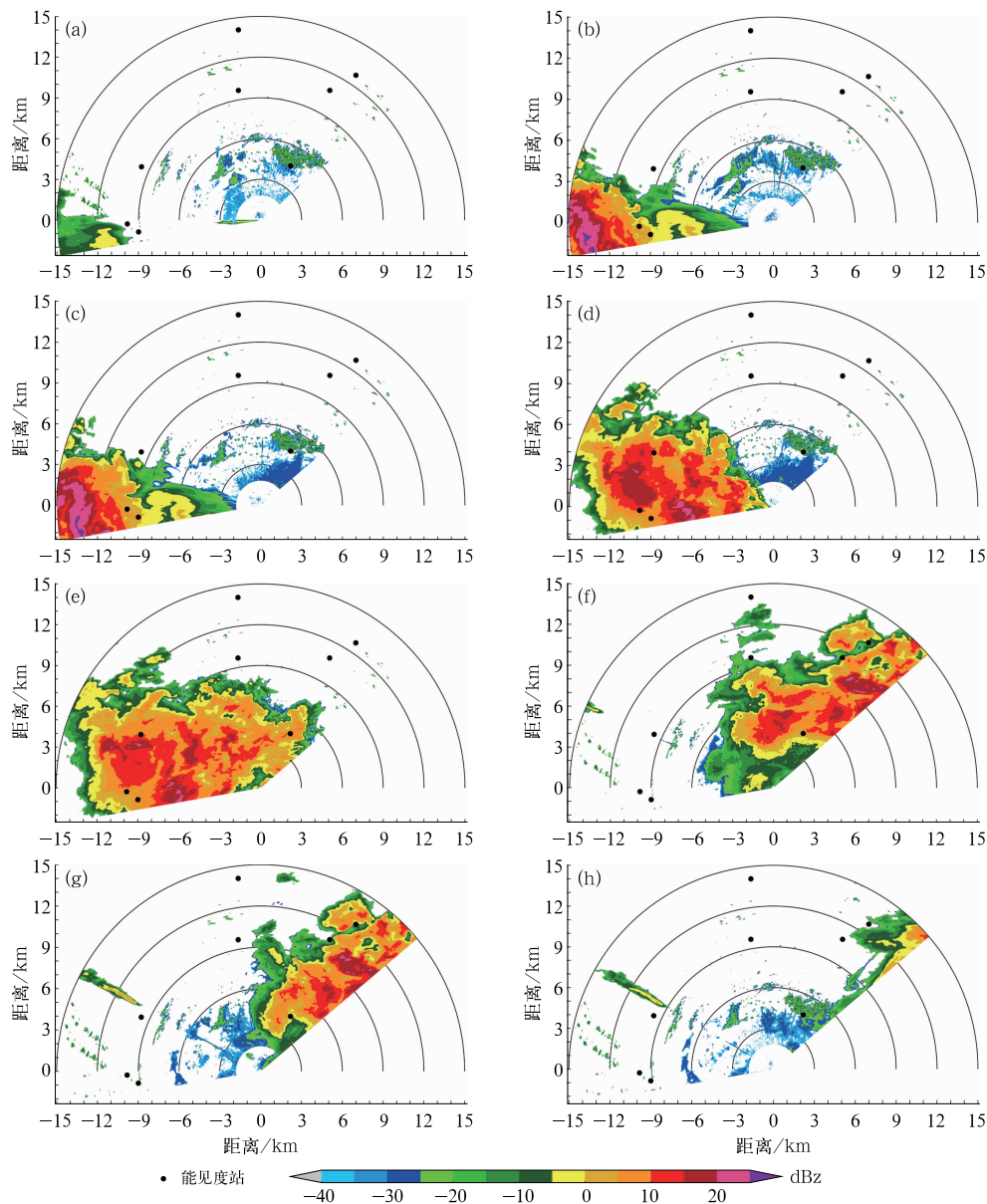


图 2 2017 年 4 月 15 日降水-雾过程经过雷达扫描区域时 PPI 模式雷达回波强度

(a)22:56—23:01,(b)23:01—23:07,(c)23:07—23:13,(d)23:13—23:18,  
(e)23:18—23:24,(f)23:33—23:38,(g)23:38—23:44,(h)23:44—23:50

Fig. 2 Scanning images of radar reflectivity in PPI mode with the precipitation-fog process passing through the radar-scanned region on 15 April 2017

(a) 22:56—23:01 BT, (b) 23:01—23:07 BT, (c) 23:07—23:13 BT, (d) 23:13—23:18 BT,  
(e) 23:18—23:24 BT, (f) 23:33—23:38 BT, (g) 23:38—23:44 BT, (h) 23:44—23:50 BT

于分离。此时,下部的强回波区域从 3 km 高度降为接地,顶部高度在 2 km 左右,并且雷达反射率强度也降到了 15 dBz 左右。这时,图上已经不再有水凝体融化带来的强回波,说明已经没有降水发生,开始呈现出上部云层和下部雨雾系统的结构。随后的图 3d 上,两个高值区域之间分离更加明显,分离带上出现了小于 -25 dBz 的回波,下部区域的强回波

进一步减弱到了 0 dBz 左右,并出现了强度在 -20 ~ -10 dBz 的区域,呈现出雾区特征。

### 2. 1. 2. 2 时间演变分析

根据图 2、图 3、图 4 中各图扫描时间,可以得出在图 3 的 RHI 扫描和图 4 的 THI 扫描进行时,降水-雾过程的位置是在图 2e 和 2f 之间。因为扫描是依次进行的,所以图 3 的 4 次扫描展示了降水-雾

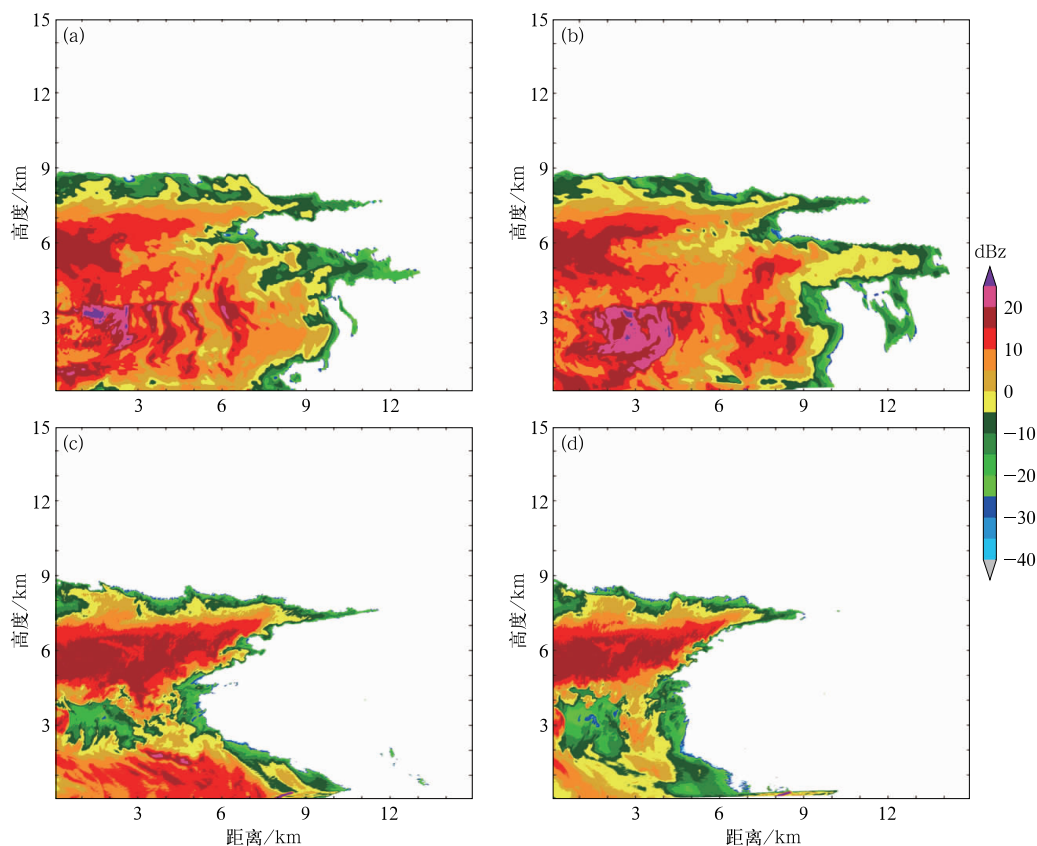


图 3 2017 年 4 月 15 日降水-雾过程经过雷达扫描区域时 RHI 模式雷达回波强度

(a) 方位角  $0^\circ$ , 23:24—23:26, (b) 方位角  $0^\circ$ , 23:26—23:28,

(c) 方位角  $300^\circ$ , 23:28—23:29, (d) 方位角  $300^\circ$ , 23:29—23:31

Fig. 3 Radar reflectivity in RHI mode with the precipitation-fog process passing through the radar-scanned region during 23:24—23:31 BT 15 April 2017

(a) azimuth angle  $0^\circ$ , 23:24—23:26 BT; (b) azimuth angle  $0^\circ$ , 23:26—23:28 BT;

(c) azimuth angle  $300^\circ$ , 23:28—23:29 BT; (d) azimuth angle  $300^\circ$ , 23:29—23:31 BT

过程从连续降水到零星降水,再到降水停止在近地面形成雨雾系统这一系列垂直结构变化过程。图 4 的 THI 扫描是紧接着图 3d 进行的,可以看到在图中下部雨雾系统接近地面部分回波强度在  $-15$  dBz 左右(此强度一般出现于成熟雾区)的区域,随着时间在不断地扩大,其厚度在不到 1 min 的时间里从近 400 m 发展到了近 800 m,说明雾区在迅速发展成熟。从图 4 中还可以看到雷达回波在高度 1.8 km 附近出现了缝隙,数据分析得到缝隙下边界附近的回波强度值是在  $-30$  dBz 左右。从 1.1 节的雷达探测能力数据可知,在边界层模式下雷达的探测能力是小于  $-27$  dBz 的,因而推断此缝隙的形成是由于回波强度弱于雷达的探测能力,此缝隙实际上是低值带而非空值带。从图 4 还可以得到,高度在 2 km 附近的低值带(即 2 km 高度附近绿色区

域加上缝隙),是在不断地变厚,说明上部云层和下部雨雾系统的联系在不断减弱。

综上所述,可以得到此过程的发展经历了连续降水到零星降水,再到降水停止逐渐形成上部云层和下部雨雾系统,最后两者逐渐分离,地面雨雾系统进一步发展形成雾这一系列变化。

### 2.1.3 降水-雾过程雷达径向速度的特征分析

根据 2.1.1.1 节的分析,降水-雾过程整体往东北方向移动,结合图 2e 和图 5a 可以看到在过程主体部分,存在西北—东南走向的零速度线,在该线的左下侧,径向速度都为负,在该线的东北侧,过程主体部分径向速度都为正,而在过程边缘,存在着大片的负径向速度区(因为径向速度由粒子速度和空气速度两部分构成,在此个例中主要贡献者为粒子速度,因而下文粒子速度也代指径向速度)。这表明过

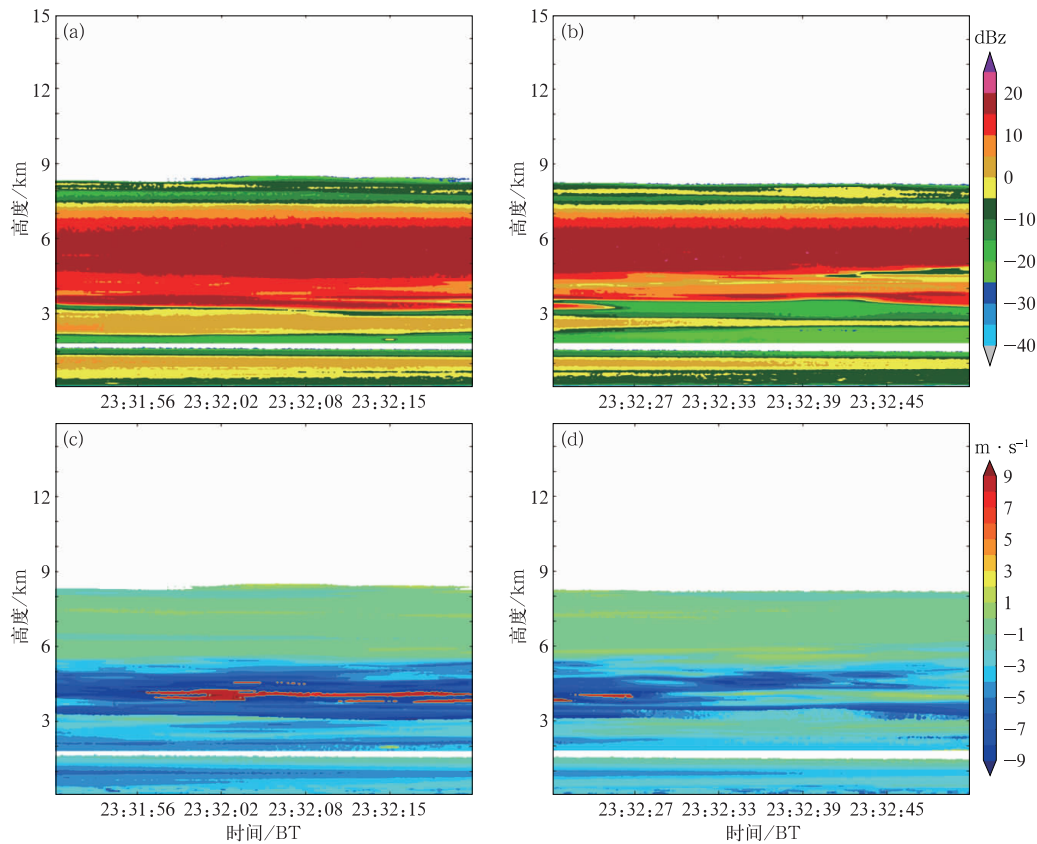


图 4 2017 年 4 月 15 日降水-雾过程经过雷达扫描区域时 THI 模式雷达回波强度(a,b)和径向速度(c,d)  
(a,c)23:31:50—23:32:21,(b,d)23:32:21—23:32:52

Fig. 4 Millimeter-wave radar scanning images of radar reflectivity (a, b) and radial velocity (c, d) in THI mode with the precipitation-fog process passing through the radar-scanned region during (a, c) 23:31:50—23:32:21 BT, (b, d) 23:32:21—23:32:52 BT 15 April 2017

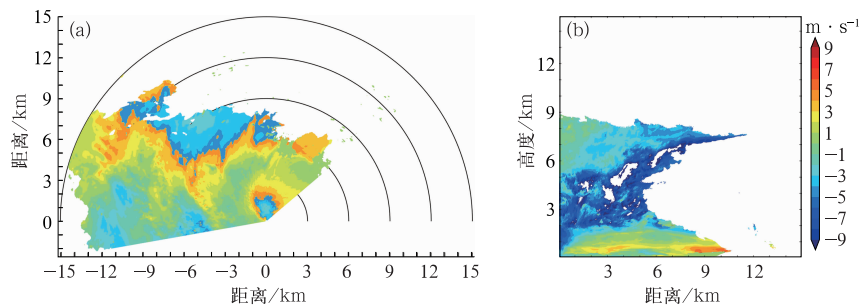


图 5 2017 年 4 月 15 日降水-雾过程经过雷达扫描区域时的典型径向速度  
(a)PPI 扫描,23:18—23:24,(b)RHI 扫描,方位角 300°,23:28—23:29

Fig. 5 Typical radial velocity image with the precipitation-fog process passing through the radar-scanned region on 15 April 2017

(a) PPI scan during 23:18—23:24 BT, (b) RHI scan during 23:28—23:29 BT at azimuth angle 300°

程的主体部分在水平方向上是统一的往东北方向移动,但是过程边缘存在着不少向雷达方向运动的粒子。图 5b 展示的是过程边缘径向速度的剖面,可以看到在过程边缘,一定高度以上的粒子都明显向雷达

方向,即倾斜向下运动。由图 4c、4d 两幅径向速度(此时也即垂直速度)可见,云中部分区域有较强的垂直运动,甚至出现了速度折叠,而近地面区域垂直速度大都在  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下,平均速度在  $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

综合分析,可以得到过程的主体水平方向运动较统一,均为东北方向,相对运动较少,但是在边缘区域,部分粒子会向主体方向运动;在垂直方向上,主体和边缘均为垂直向下运动,但是最边缘区域不是垂直向下,而是倾向中心向下。因此在整个过程中,边缘区域是在对主体区域不断进行补偿,从而使过程维持发展。

## 2.2 能见度站和自动气象站的观测

从 2.1.1 节的分析可得,在时段 1,过程主要影响位于毫米波雷达西面的 3 个站点:大猫岛站、凉帽山岛站和白鹅山礁站;在时段 2,过程主要影响的是毫米波雷达北面的 3 个站点:金鸡山站、南海学校站、老鼠山屿站;另外过程对岙山万向站的影响跨越

了两个时段。受影响时各个站点的能见度变化情况如图 6 和表 2 所示。从表 2 可以看到,受过程影响,各个站点的能见度都出现了大幅度的下降。将图 2 和图 6 进行对照,可以得到,站点能见度都是在过程接近时开始下降,在过程即将离开时达到最低(除大猫岛继续下降)。

对过程过境前后毫米波雷达扫描区域及扫描区域外附近区域的自动气象站降水资料进行了统计,结果显示在过程过境的相应时段,毫米波雷达扫描区域内未观测到有效降水,扫描区域外附近区域共观测到 4 次 0.1 mm 的有效降水(小干岛 23:44,小干岛 23:46,大榭南 23:48,大榭东 00:06),表明此过程主要带来的是雾而非降水。

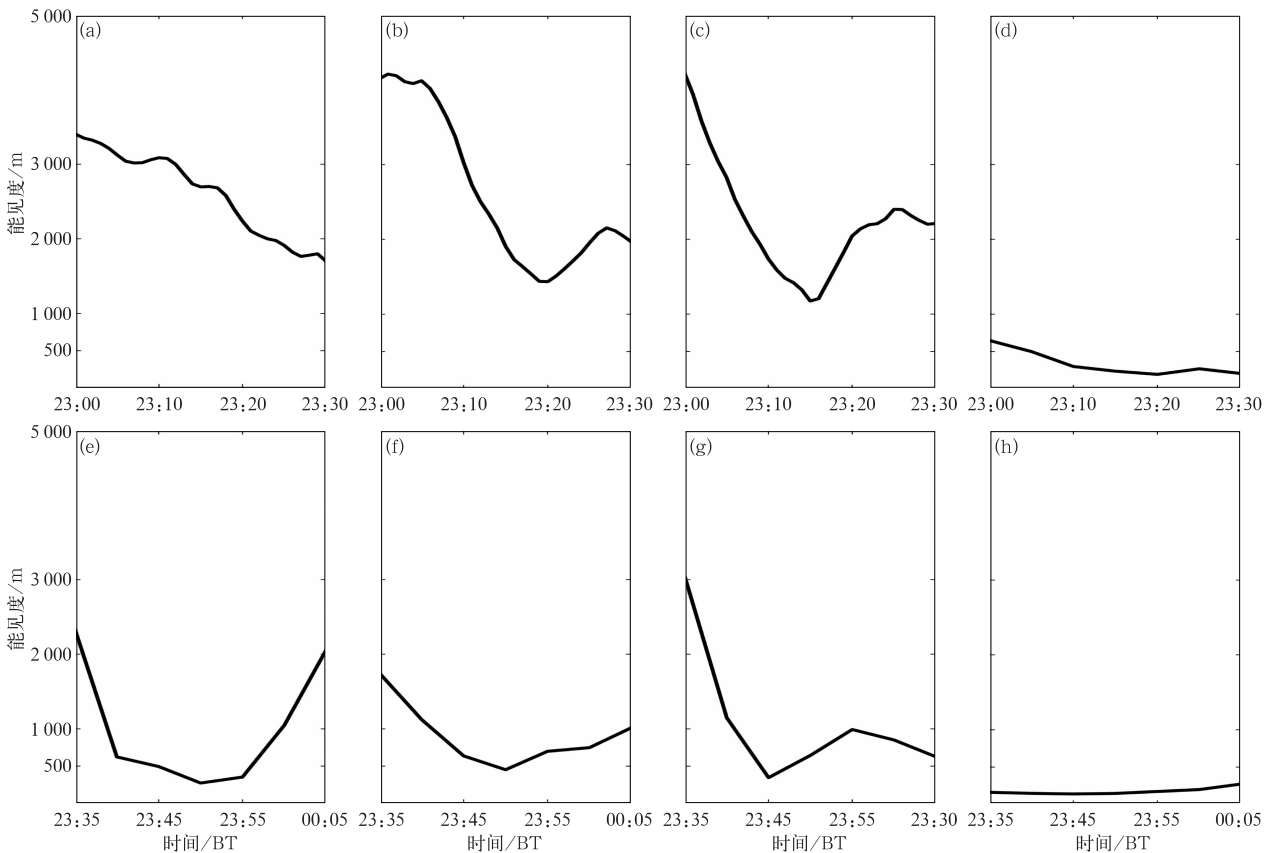


图 6 2017 年 4 月 15 日降水-雾过程经过能见度站时站点能见度变化

(a)大猫岛站,(b)凉帽山岛站,(c)白鹅山礁站,(d)岙山万向站,  
(e)金鸡山站,(f)南海学校站,(g)老鼠山屿站,(h)岙山万向站

Fig. 6 Variations of visibility with the processing passes through the visibility stations on 15 April 2017

(a) Damaodao Station, (b) Liangmaoshandao Station, (c) Baieshanjiao Station, (d) Aoshanwanxiang Station,  
(e) Jinjishan Station, (f) Nanhai School Station, (g) Laoshushany



表 2 过程过境前和过境时各站点能见度(单位:m)

站名	过境前	过境时
大猫岛	3000	1800
凉帽山岛	4100	1400
白鹅山礁	4200	1100
金鸡山	2300	280
南海学校	1700	440
老鼠山屿	3000	320
岙山万向	650	130

### 3 低空雷达反射率强度和近地面能见度关系

对于雷达反射率( $Z$ )和能见度( $Vis$ )之间的关系,国外已经进行过一些研究。Gultepe et al(2006; 2009)根据试验结果得出符合  $\gamma$  分布的能见度经验关系式为:

$$Vis = 0.04e^{-0.098836Z}$$

式中: $Z$  的单位是 dB,  $Vis$  的单位是 km。Li et al (2014)得出的经验关系式为

$$Vis = 0.018Z^{-0.262}$$

式中: $Z$  的单位是  $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $Vis$  的单位是 km。通过对比得出  $Vis = aZ^b$  指数关系模型的拟合效果优于基于  $\gamma$  分布的拟合效果(Li et al, 2017),因而以下对雷达反射率强度和能见度之间的关系也采用  $Vis = aZ^b$  模型。

从 2.2 节的分析可知在过程离开前站点能见度随时间逐渐下降的过程,而毫米波雷达对各个站点的扫描实际上都是处于站点上空几百米的位置(根据各个站点离开毫米波雷达的位置不同,最低为岙山万向站的 235 m,最高为金鸡山社区站的 660 m),从高空影响地面需要一定的时间,因而在拟合时选取的能见度不仅是毫米波雷达扫描时刻的能见度,对之后一小段时间内的能见度也分别作了拟合,得到雷达反射率与扫描后 3 min 左右站点的能见度拟合效果最佳。根据 2.1.3 节的计算结果,雾区的平均垂直速度在  $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 3 min 左右的时间差正好与液态水从毫米波雷达扫描高度到达地面的时间相一致。

对上述效果最佳的能见度和雷达反射率进行拟

合,得到的关系式为

$$Vis = 2.283Z^{-0.121}$$

式中: $Z$  的单位是 dBz,  $Vis$  的单位是 km。拟合曲线和观测数据如图 7 所示。从图 2 可以看到金鸡山社区站位于两个强回波区域之间,使得其能见度值和雷达反射率之间的关系与其他站点差异较大,因而在拟合时排除了该站点。从图 7 可以看到,在拟合曲线的上方和下方具有部分数据点偏离较远,对数据进行进一步分析发现偏高的数据点均来自于西部,偏低的数据点主要来源于岙山万向站。从表 2 可以看到,西部站点在过程过境前和过境时能见度值都要高于北部站点,导致拟合后西部站点部分数据点偏高。造成这一现象的可能原因有两个:一是这两个区域的能见度站分属两个地区,观测仪器的校准不一致,导致观测结果的差异;二是过程经过了中间这一段海区之后,性质发生了改变,从而能见度出现了明显差异。偏低的数据点,主要是因为岙山万向站的能见度在 22:10 左右就已经降至 1000 m 以下,过程的影响使该站点从大雾加强为浓雾,与其他站点相比,其能见度始终明显偏低,因而出现数据点偏离拟合曲线下方较远的情况。

综上所述,拟合曲线总体上较好地模拟了低空雷达反射率强度和近地面能见度之间的关系。由于观测仪器的校准不一致或中间经过海区等原因,以及个别站点预先已经起雾等因素影响,导致部分数据点与拟合曲线偏离较远,未来还需要做一定的改进。

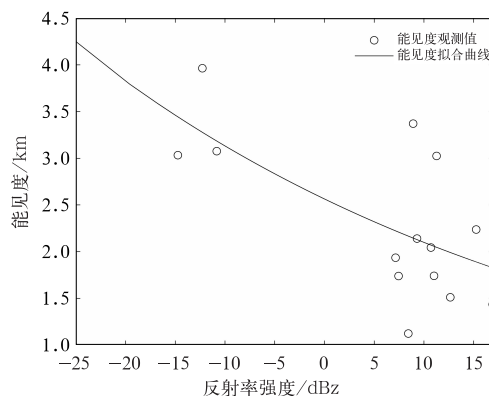


图 7 能见度和雷达反射率强度关系

Fig. 7 Relationship between visibility and radar reflectivity

## 4 结 论

通过对毫米波雷达数据和能见度站数据的分析,得出的主要结论如下:

(1) 根据 PPI 模式扫描结果,降水-雾过程的空间尺度约为 15 km,强雷达反射率中心分为几个区域,集中度不高,最强反射率在 25 dBz 左右,最弱反射率在 -20 dBz 左右。

(2) 结合 RHI 模式和 THI 模式扫描结果,完整地展示了降水-雾过程从连续降水到零星降水,之后降水停止在近地面形成雨雾系统,再到转变为雾的垂直结构变化过程。

(3) 通过径向速度的分析,显示过程的主体结构较稳定,边缘区域在对主体区域进行补偿,使过程维持发展。

(4) 毫米波雷达西部能见度站点在过程过境前和过境时能见度值都要高于北部站点。各站点能见度在过程接近时开始下降,在过程即将离开时达到最低(除大猫岛继续下降)。降水资料分析表明此过程主要带来的是雾而非降水。

(5) 用  $V_{is} = aZ^b$  的经验公式探索低空雷达反射率强度和近地面能见度关系,得到  $a = 2.283$ ,  $b = -0.121$  的拟合结果,总体上较好地模拟了低空雷达反射率强度和近地面能见度之间的关系。

## 参 考 文 献

- 郭丽君,郭学良,2016.北京 2009—2013 年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因[J].大气科学,40(2):296-310. Guo L J, Guo X L,2016. The type,vertical structure and physical formation mechanism of persistent heavy fog events during 2009—2013 in the Beijing Region[J]. Chin J Atmos Sci,40(2):296-310 (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).
- 李铁林,雷恒池,刘艳华,等,2010. 河南春季一次层状冷云的微物理结构特征分析[J]. 气象,36(9):74-80. Li T L, Lei H C, Liu Y H, et al,2010. Microphysical characteristics of a precipitation process in Henan Province[J]. Meteor Mon,36(9):74-80 (in Chinese).
- 刘黎平,仲凌志,江源,等,2009. 毫米波测云雷达系统及其外场试验结果初步分析[J]. 气象科技,37(5):567-571. Liu L P, Zhong L Z, Jiang Y, et al,2009. Cloud radar and its field experiments in China[J]. Meteor Sci Technol,37(5):567-571(in Chinese).
- 孙晓光,刘宪勋,贺宏兵,等,2011. 毫米波测云雷达融化层自动识别技术[J]. 气象,37(6):720-726. Sun X G, Liu X X, He H B, et al,2011. Automatic identification technology of melting layer in millimeter wave cloud radar data[J]. Meteor Mon,37(6):720-726(in Chinese).
- 王彬华,1983. 海雾[M]. 北京:海洋出版社. Wang B H,1983. Sea Fog[M]. Beijing:China Ocean Press(in Chinese).
- 王德旺,刘黎平,仲凌志,等,2012. 毫米波雷达资料融化层亮带特征的分析及识别[J]. 气象,38(6):712-721. Wang D W, Liu L P, Zhong L Z, et al,2012. Analysis of the characters of melting layer of cloud radar data and its identification[J]. Meteor Mon,38(6):712-721(in Chinese).
- 王柳柳,刘黎平,余继周,等,2017. 毫米波云雷达冻雨-降雪微物理和动力特征分析[J]. 气象,43(12):1473-1486. Wang L L, Liu L P, Yu J Z, et al,2017. Microphysics and dynamic characteristic analysis of freezing rain and snow observed by millimeter wave radar[J]. Meteor Mon,43(12):1473-1486(in Chinese).
- 吴彬贵,张宏升,张长春,等,2010. 华北地区平流雾过程湍流输送及演变特征[J]. 大气科学,34(2):440-448. Wu B G, Zhang H S, Zhang C C, et al,2010. Characteristics of turbulent transfer and its temporal evolution during an advection fog period in North China[J]. Chin J Atmos Sci,34(2):440-448(in Chinese).
- 吴举秀,魏鸣,周杰,2013. 非球形冰晶的毫米波 k-Ze 关系研究[J]. 遥感学报,17(6):1377-1395. 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):1377-1395(in Chinese).
- 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. Wu J Y, Liu L P, Zheng J F,2016. Contrast assessment and analysis of a solid state millimeter wave radar modes[J]. Meteor Mon,42(7):790-798(in Chinese).
- 杨丹丹,申双和,邵玲玲,等,2010. 雷达资料和数值模式产品融合技术研究[J]. 气象,36(8):53-60. Yang D D, Shen S H, Shao L L, et al,2010. A study on blending radar and numerical weather prediction model products[J]. Meteor Mon,36(8):53-60 (in Chinese).
- 杨晓,黄兴友,杨军,等,2019. 毫米波雷达云回波的自动分类技术研究[J]. 气象学报,77(3):541-551. Yang X, Huang X Y, Yang J, et al,2019. A study on auto-classification of cloud types based on millimeter-wavelength cloud radar observations[J]. Acta Meteor Sin,77(3):541-551(in Chinese).
- 张佃国,王烁,郭学良,等,2020. 基于机载 Ka 波段云雷达和粒子测量系统同步观测的积层混合云对流泡特征[J]. 大气科学,44(5):1023-1038. Zhang D G, Wang S, Guo X L, et al,2020. The properties of convective generating cells embedded in the stratiform cloud on basis of airborne Ka-band precipitation cloud radar and droplet measurement technologies[J]. Chin J Atmos Sci,44(5):1023-1038(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).
- 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. Zhong L Z, Liu L P, Ge R S, 2009. Characteristics about the millimeter-wavelength radar and its status and prospect in and abroad[J]. Adv Earth Sci, 24(4):383-391(in Chinese).
- 周福, 钱燕珍, 金靛, 等, 2015. 宁波海雾特征和预报着眼点[J]. 气象, 41(4):438-446. Zhou F, Qian Y Z, Jin L, et al, 2015. Characteristics and forecasting focus of sea fog in Ningbo[J]. Meteor Mon, 41(4):438-446(in Chinese).
- 朱怡杰, 邱玉琚, 陆春松, 2019. 青藏高原那曲夏季云中水成物分布特征的毫米波雷达观测[J]. 气象, 45(7):945-957. Zhu Y J, Qiu Y J, Lu C S, 2019. Millimeter wave radar observation of hydrometeor distribution characteristics of cloud in summer in Nagqu, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Meteor Mon, 45(7):945-957(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.
- Byers H R, 1959. General Meteorology[M]. 3rd ed., New York: McGraw-Hill.
- Edson J, Crawford T, Crescenti J, et al, 2007. The coupled boundary layers and air-sea transfer experiment in low winds[J]. Bull Amer Meteor Soc, 88(3):341-356.
- Fuzzi S, Facchini M C, Orsi G, et al, 1992. The Po Valley fog experiment 1989[J]. Tellus Ser B: Chem Phys Meteor, 44(5):448-468.
- Fuzzi S, Laj P, Ricci L, et al, 1998. Overview of the Po Valley fog experiment 1994 (CHEMDROP)[J]. Contrib Atmos Phys, 71(1):3-19.
- Gultepe I, Müller M D, Boybeyi Z, 2006. A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models[J]. J Appl Meteor Climatol, 45(11):1469-1480.
- 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):341-359.
- 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.
- Lewis J M, Koraćin D, Redmond K T, 2004. Sea fog research in the united kingdom and united states: a historical essay including outlook[J]. Bull Amer Meteor Soc, 85(3):395-408.
- Li Y L, Hoogeboom P, Russchenberg H, 2014. Observations and modeling of fog by cloud radar and optical sensors[C]// Proceedings of the 44th European Microwave Conference. Rome: IEEE:8-10.
- Li Y L, Hoogeboom P, Russchenberg H W J, 2017. A novel radar-based visibility estimator[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 55(6):3150-3168.
- Niu S J, Lu C S, Liu Y G, et al, 2010. Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet spectrometer: a case study[J]. Adv Atmos Sci, 27(6):1259-1275.
- Oliver D A, Lewellen W S, Williamson G G, 1978. The interaction between turbulent and radiative transport in the development of fog and low-level stratus[J]. J Atmos Sci, 35(2):301-316.
- Pilié R J, Mack E J, Rogers C W, et al, 1979. The formation of marine fog and the development of fog-stratus systems along the California coast[J]. J Appl Meteor, 18(10):1275-1286.
- Tardif R, Rasmussen R M, 2007. Event-based climatology and typology of fog in the New York City region[J]. J Appl Meteor Climatol, 46(8):1141-1168.
- Tardif R, Rasmussen R M, 2008. Process-oriented analysis of environmental conditions associated with precipitation fog events in the New York City region[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(6):1681-1703.
- Westcott N E, Kristovich D A R, 2009. A climatology and case study of continental cold season dense fog associated with low clouds[J]. J Appl Meteor Climatol, 48(11):2201-2214.
- Willett H C, 1928. Fog and haze, their causes, distribution, and forecasting[J]. Mon Wea Rev, 56(11):435-468.