

基于雷达观测的福建转折性降雪垂直特征分析

官晓军¹, 戚友存^{*2}, 江颖³, 李婷婷⁴, 朱自伟², 姜立智¹, 汪澜¹

1 福建省灾害天气重点实验室, 福州, 350007

2 中国科学院地理科学与资源研究所、中国科学院大学, 北京, 100101

3 福州市气象局, 福州, 350007

4 福建省气象台, 福州, 350007

摘要: 2022年2月19-23日福建地区出现转折性降雪天气, 环流背景是中层暖层和低层冷层并存, 地面有雨、雨夹雪和纯雪等多种天气现象, 预报难度大。基于天气雷达等资料, 采用基于粒子谱数据的降水类型分类方法对各站点降纯雪和雨夹雪时段进行划分, 结合天气形势和雷达参量垂直特征, 重点分析了环境温度演变对转折性降雪的影响以及转折性降雪的垂直演变特征。结果表明: (1) 地面气温和地形分布较为均匀时, 可根据反射率因子垂直廓线(VPR)和环境温度特征判断雨夹雪和纯雪之间的转换, 即纯雪阶段 VPR 随高度降低单调递增, 雨夹雪阶段廓线中层存在融化层亮带特征; 分析时应特别关注雷达对低层降水的观测能力, 当雷达受观测环境限制, 无法反映近地层温度差异造成的降水特征变化时, 即使在高空 VPR 相似的情况下, 地面降水类型也可能显著不同; (2) 降雪粒子的双偏振雷达参量垂直特征表明, 转折性降雪高层和融化层高度以上的粒子增长机制与一般纯雪过程类似, 不同点在于受中层暖层和低层冷层影响, 粒子经历了复杂的融化和冻结过程。粒子下落到暖层后出现融化层亮带特征, 融化层以下则视低层冷层强度和地面气温不同, 粒子完全或部分冻结, 地面可能出现纯雪或雨夹雪; 雷达参量垂直结构特征(例如融化层亮带的强度变化)能实时反映环境温度变化, 有助于判断地面降水粒子相态, 可一定程度上弥补模式预报不够精准和单点探空垂直观测欠缺的问题。

关键词: 转折性降雪, 双偏振雷达, 反射率因子垂直廓线, 准垂直廓线, 垂直特征

文章编号 2023063B

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

Analysis of vertical characteristics of a transitional snow event based on weather radars in Fujian

收稿日期 2023-04-17; 网络预出版日期

作者简介 官晓军, 女, 1986年出生, 高级工程师, 主要从事强对流天气机理和预报技术研究。E-mail:40382689@qq.com

通讯作者 戚友存, 男, 研究员, 主要从事雷达气象、水文研究, E-mail:Youcun.Qi@igsnr.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划(2022YFC3002904)

Guan Xiaojun¹, Qi Youcun², Jiang Ying³, Li Tingting⁴, Zhu Ziwei², Jiang Lizhi¹,
Wang Lan¹

¹ Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fujian Meteorological Bureau, Fuzhou, 350007

² Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of
Sciences, Beijing, 100101

³ Fuzhou Meteorological Bureau, Fuzhou, 350007

⁴ Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou, 350007

Abstract: A transitional snow event occurred in Fujian Province on 19 to 23 February 2022 and was characterized by the co-existence of warm layer in the middle troposphere and cold layer in the lower troposphere. Multiple precipitation types occurred on the ground including rain, snow and wet snow, etc., increasing the difficulty of forecasting. Based on data from weather radars and other sources, a classification method of precipitation types is firstly used to identify the time periods of snow and wet snow at each weather station, on this basis, the influence of environmental temperature evolution on transitional snow event as well as the vertical characteristics of transitional snow event are investigated by analyzing synoptic circulation and vertical features of radar variables. The results show: (1) the transition between snow and wet snow could be clearly distinguished according to the characteristics of VPR and environmental temperature information in areas that topography and surface temperature are uniformly distributed, that is, VPR monotonously increases with decreasing height during snow stage, while a significant bright band presents in the middle layer of VPR during wet snow stage. Great emphasis should be put on the capability of weather radars in observing precipitation in the lower level. If radar variables could not capture the change of precipitation characteristics caused by the difference of temperature in the near-surface layer due to the limitation of observation environment, the precipitation types on the ground could be markedly different even though the VPR features resemble each other in higher layer. (2) the vertical characteristics of polarimetric radar variables indicate that, the growth mechanism of hydrometeors in the upper layer and above melting layer is similar to general dry snow events, the major differences of transitional snow events are the complicated melting and refreezing processes of particles caused by the warm layer and cold layer. A bright band signature displays when hydrometeors falling through warm layer, then melted particles are fully or partially frozen reaching the ground as snow or wet snow, depending on the intensity of cold layer beneath warm layer and temperature at surface. The vertical features of radar variables (e.g. the change of intensity of bright band) could timely reflect the change of environmental temperature, which is conducive to distinguish precipitation types and could make up for the inaccurate forecasting of numerical model and the absence of atmospheric profiles to some extent.

Key words: transitional snow event, polarimetric radar, vertical profile of reflectivity factor, quasi-vertical profile, vertical characteristics

1 引言

雪是冬季降水的主要形式之一，强降雪常对交通、电力、农业生产和社会经济等造成重大损失。由于对降雪的形成和发展机制、微物理过程等认知不足，现有数值模式的微物理方案无法准确描述降雪的微物理过程，主观和客观预报效果都十分有限（陈刚，2019；Vignon, et al. 2019）。为了提高对降雪发生发展机制的认识，许多学者对降雪天气的大尺度环流形势、中尺度动力/热力过程和微物理特征等方面开展研究（高茜等，2020；黄钰等，2020；刘香娥等，2022；王东海等，2008，2013）。近年来，观测技术发展尤其是多波段多普勒天气雷达和地基粒子谱观测设备的普及，为深入研究降雪的微物理特征和垂直增长机制等提供了手段。

目前，国内外关于地面降雪微物理特征的研究已取得一定进展。Brandes et al. (2007) 首次基于降雪粒子谱观测，得到雪的体积中值粒径与下落速度以及与密度的经验关系，并分析了雪的标准化 Gamma 分布特征，该研究证实粒子谱数据用于降雪微物理特征分析的可行性。Zhang et al. (2011) 基于 Brandes et al. (2007) 的雪密度经验公式，根据雪的下落速度对密度进行调整，提高了雪的粒子谱数据反演雷达参量的精度。国内也对冬季不同类型降水粒子包括干雪、湿雪和霰等的粒子谱和下落速度特征进行研究，初步得到了不同地区降雪粒子的微物理特征（贾星灿等，2017；Pu et al. 2020）；陶然亭（2020）还基于二维雨滴谱仪和双偏振雷达数据分析了南京地区纯雪过程（不包含混合相态降水）的地面降雪微物理特征并建立适用于该地区的定量降雪估计关系。

加强对降雪粒子垂直增长机制的认识对改进模式参数化方案和提高降雪过程诊断分析和预报技术水平都非常关键。一般而言，冰晶粒子增长主要有三种过程，即水汽凝华、聚并增长和淞附过程（Pruppacher and Klett 1997; Wallace and Hobbs 2006; Houze 2014）。双偏振雷达观测的水平反射率因子 Z_H 反映采样体积内的粒子数浓度，差分反射率因子 Z_{DR} 与粒子介电常数、形状、倾角和密度有关，比差分相位移 K_{DP} 受数浓度与粒子大小影响，其数值可用于评估含冰量，相关系数 ρ_{hv} 则与粒子介电常数、大小和形状有关，这些雷达参量的变化特征可以反映雪的枝状生长、聚并和淞附过程（Allabakash, et al. 2019）。通过双偏振雷达参量特征分析和粒子散射模型的验证，许多研究指出融化层以上 Z_{DR} 和 K_{DP} 突增与

枝状和板状冰晶增长有关 (Kennedy and Rutledge 2011; Griffffin et al. 2014; Schrom et al. 2015; Kumjian et al. 2016; Griffffin et al. 2018) ; “播-种”过程 (seeder-feeder process) 的冰晶生长机制可以解释 Z_{DR} 和 K_{DP} 垂直廓线上两个参量的增强带存在垂直偏移的原因 (Moisseev et al. 2015; Kumjian and Lombardo, 2017)。有研究将环境温度与雪的增长机制相联系, 认为原始冰晶在 -25°C 以下形成, 表现为 Z_{DR} 和 K_{DP} 变化率增大, 枝状冰晶在 $-20\sim-15^{\circ}\text{C}$ 之间增长, 表现为 Z_{DR} 显著增强的条带, 而冰晶的聚并增长主要发生在 -15°C 以上, Z_H 增大和 Z_{DR} 减小 (Schneebeli et al. 2013)。国内该领域的研究起步较晚, 但近年来也开展了降雪垂直增长过程研究 (武静雅等, 2021)。

以上国内外研究主要针对高纬度地区降雪或纯雪阶段, 较少涉及纯雪和湿雪之间相态转变过程, 而南方低纬度地区冬季降雪多是转折性降雪天气, 中层常受暖湿气流影响, 低层叠加冷空气垫, 地面存在纯雪和湿雪的过渡带, 还可能出现冻雨等天气现象, 降水落区、地面降水类型以及纯雪和湿雪转换时间的精准预报较为困难。针对该预报难题, 不少学者通过统计气候判定标准和开展降温机理研究为雨雪相态转换预报提供依据 (许爱华等, 2006; 孙燕等, 2013; 刘梅等, 2021)。此外, 许多研究也指出中层暖层/融化层和近地层冷层/再冻结层内复杂的微物理过程对降水形成和发展具有重要作用 (Trömel et al. 2014, 2017, 2019; Doviak and Zrnić 1993; Kumjian et al. 2013), 因此, 加强转折性降雪的影响机制和微物理特征研究对提高南方降雪预报服务能力非常有意义。本文以 2022 年 2 月 19-23 日 (北京时间, 下同) 福建省西北部和北部地区一次转折性降雪天气为例, 基于观测和模式资料、粒子谱数据和多部天气雷达观测, 结合天气形势, 重点研究转折性降雪过程的环境温度场演变和降雪的垂直演变特征, 探讨雷达参量垂直特征演变在转折性降雪天气诊断分析中的应用。

2 资料和方法

2.1 资料介绍

此次过程的主要降雪阶段集中在 2 月 20 日 17 时-21 日 10 时, 本文主要针对该时段进行分析。使用的资料包括:

- (1) 08 和 20 时常规高空观测资料、3h 间隔的常规地面观测资料、区域自

动站逐小时观测数据和福建中尺度数值预报业务系统（Fujian-Weather Research and Forecasting model, FJ-WRF）20 日 20 时起报预报时效 12h 的逐小时预报场（水平分辨率 $0.09^{\circ} \times 0.09^{\circ}$ ，垂直层 40 层），用于分析天气形势、地面和高空环境温度场演变。

图 1 给出福州、邵武探空站观测和模式插值的湿球温度廓线，检验 FJ-WRF 模式对本次过程的预报效果。湿球温度是指仅通过加湿使空气达到绝热饱和状态时所达到的温度，与气块的气压、温度和湿度有关，能够综合表征气块的温度和水汽含量。从图中可以看出，模式预报的湿球温度廓线上对流层中层存在暖层和低层有冷垫的垂直结构与实况相符，并预报出低层冷层随时间减弱，但是模式没有反映出中层暖层减弱的特征，且近地层气温也比实况略高。总体而言，模式较好地预报出温度层结演变过程，模式逐小时输出的高空要素预报场可弥补探空观测时空分辨率不足的问题。

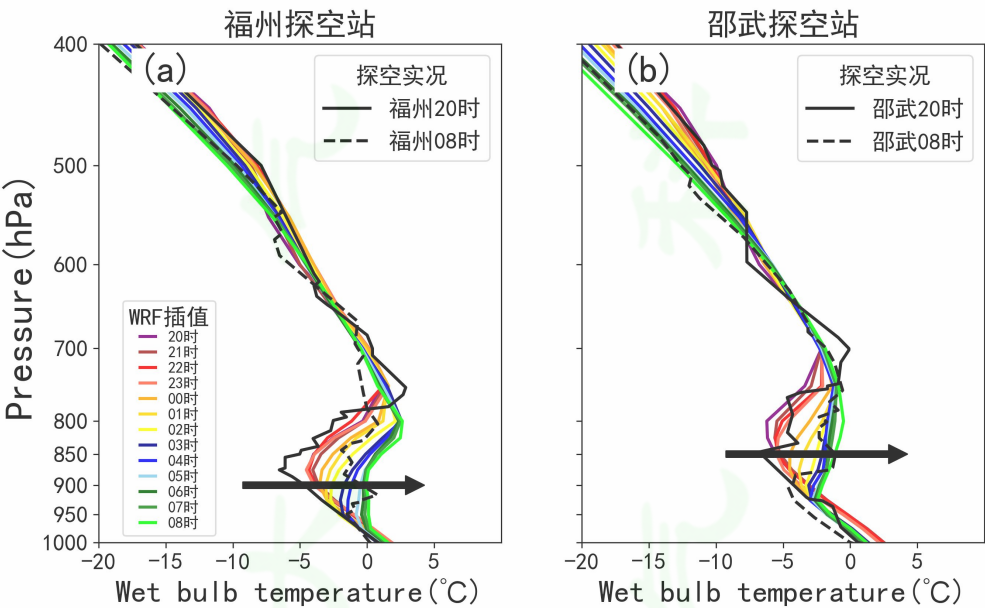


图 1 福州（a）和邵武（b）探空站观测和模式插值湿球温度廓线对比，图中箭头表示湿球温度廓线上低层冷层减弱的趋势

Figure 1. Comparison of wet bulb temperature profiles from observation and interpolated from WRF at Fuzhou (a) and Shaowu (b) sounding stations, arrows indicate the weakening of cold layer in the lower level of wet bulb temperature profiles

（2）福建省降水粒子谱数据。该数据由德国 OTT 公司生产的 PARSIVEL 自动降水激光粒子谱仪观测得到，仪器通过激光系统测量降水粒子的下落速度和等效粒子直径（以下简称直径），直径和速度通道各 32 个，测量直径范围 0.25-26mm 和下落速度范围 $0.1-20\text{ms}^{-1}$ ，采样面积 0.0054m^2 。该仪器适用于液态和固态降水

粒子谱的测量,已广泛应用于降水微物理特征和雷达定量降水估测改进等方面的研究(黄钦等, 2018; Pu et al. 2020; 张哲等, 2021)。福建省激光粒子谱仪与基本气象观测站同址,日常观测业务中,降水现象仪软件基于粒子谱数据得到的降水现象已替代台站人工天气现象观测。本次过程的降水粒子谱数据,用于精细地判断各台站降纯雪和雨夹雪的时间段,以便针对不同类型降雪的垂直特征进行分析。

(3) 建阳和宁德 S 波段单偏振业务雷达以及长乐 S 波段双偏振业务雷达(雷达位置见图 2), 其中建阳和宁德雷达天线馈源海拔高度分别是 290m 和 546m, 反射率因子径向分辨率 1km, 长乐雷达天线馈源海拔高度 642m, 所有雷达参量径向分辨率 250m。

由于过程期间部分基本天气观测站降水现象仪软件输出的降水现象与实况不符,启动了人工观测,本文给出的实况以人工观测报告和过程期间收集的雪灾上报材料为准。

2.2 方法

2.2.1 基于粒子直径和下落速度经验关系的降水类型分类方法

降水类型分类方法基于降水粒子谱数据,根据各种降水类型粒子下落速度和直径之间的经验关系,统计实测下落速度和经验下落速度之间的偏差,当某种降水类型的偏差最小并小于设定的阈值时,则判别为该降水类型(Lee et al. 2015)。在缺乏可靠自动观测和精细人工观测资料时,该方法有助于精细地识别地面降水类型的演变。

分类前首先对粒子谱数据进行质量控制,包括:(1) 由于信噪比较低,剔除前两个直径通道数据;(2) 1min 采样时间内,剔除粒子总数小于 10 个的样本;(3) 以有效采样面积取代原始采样面积,去除边界效应;(4) 统计所有样本中每个直径通道的速度值,利用 3 倍标准差法剔除速度异常值。数据质控后进行偏差计算,根据偏差阈值(经统计,本次过程阈值取 0.82 时,分类结果与实况匹配度最高),对降水类型进行分类。偏差 f 计算公式如下:

$$f_k = \frac{\sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} N_{ij} |V_k(D_{obs,ij}) - V_{obs,ij}|}{\sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} N_{ij}} \quad (1)$$

公式 1 中 i 和 j 分别表示直径和速度通道数, k 表示降水类型 ($k=1,...,6$), $D_{obs,i,j}$ 和 $V_{obs,i,j}$ 分别是实测粒子的直径和下落速度, $V_k(D_{obs,i,j})$ 表示第 k 中降水类型直径 $D_{obs,i,j}$ 对应的经验下落速度, $N_{i,j}$ 表示 i 直径通道和 j 速度通道的粒子数。文中降水类型包括雨、雪 (枝状、板状、针状)、霰和湿雪。各降水类型下落速度和直径之间的经验关系如下:

$$\text{雨} \quad V = -0.1021 + 4.932 * D - 0.9551 * D^2 + 0.07934 * D^3 - 0.00223626 * D^4 \quad (2)$$

$$\text{枝状雪花} \quad V = 0.79 * D^{0.24} \quad (3)$$

$$\text{板状雪花} \quad V = 0.71 * D^{0.35} \quad (4)$$

$$\text{针状雪花} \quad V = 0.99 * D^{0.71} \quad (5)$$

$$\text{霰} \quad V = 1.25 * D^{0.94} \quad (6)$$

公式 2-6 中, V 表示下落速度, D 表示直径, 其中雨的直径和下落速度关系来自 Brandes (2002), 适用于直径小于 6mm 的雨滴, 雪花和霰的经验关系来自 Lee et al. (2015)。为避免降水类型分类结果跳跃不稳定, 每 10min 样本计算 1 次偏差 f , 当某种降水类型的 f 最小且小于阈值时, 则该时段的降水归为此类, 当所有类型的 f 都大于阈值时, 判定为湿雪 (雨夹雪)。本文限于观测条件, 并不对枝状、板状和针状雪花进行细分, 统一归为纯雪。

2.2.2 雷达参量垂直廓线计算方法

雷达垂直廓线 (Vertical profile, VP) 表征雷达观测范围内一定区域的平均雷达参量的垂直分布, 反映的是天气系统垂直结构特征, 可用于融化层亮带及其影响高度识别、亮带订正和暖云降水特征判别等 (Xu et al. 2008; Zhang et al. 2008; Zhang and Qi, 2010), 该方法适用于雷达观测区域降水类型较为均匀的情况。

雷达准垂直廓线 (Quasi-vertical profile, QVP) 是指用选取雷达高仰角 ($10-20^\circ$) 计算方位角平均的雷达参量 (包括 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 ρ_{hv}) 垂直廓线, 其优点是高仰角径向数据可近似表征垂直特征, 且降低了距雷达较远区域波束展宽的影响, 早期用于解决融化层内差分位相 Φ_{DP} 噪音过大的问题 (Trömel et al. 2013, 2014), 后被广泛应用于雷达垂直特征分析 (Ryzhkov et al. 2016)。当雷达观测

区域内降水类型比较均匀时，可选取全方位角平均，当雷达观测区域内的降水类型差异较大时，可设定指定方位角范围进行平均。

3 实况和天气形势

3.1 实况介绍

本次转折性降雪天气过程的主要特点是降雪范围广、强度大且持续时间长，并且降雪影响到中部沿海地区，这在福建降雪天气中是非常少见的，为近 20 年 2 月同期范围最大。过程实况如图 2 所示，降雪主要分布在南平、宁德和三明北部和福州北部地区，雨夹雪分布在三明中部和福州的部分地区。整个过程中，有 18 个县（市、区）的城区出现积雪，积雪较深的主要是高海拔山区，其中雪深最大的是寿宁，达到 13cm。本次过程的预报难点在于降雪范围的南边界不好把握，中部地区降雪类型复杂（纯雪、雨夹雪，局地出现冻雨），且对降雪量级预估偏小。

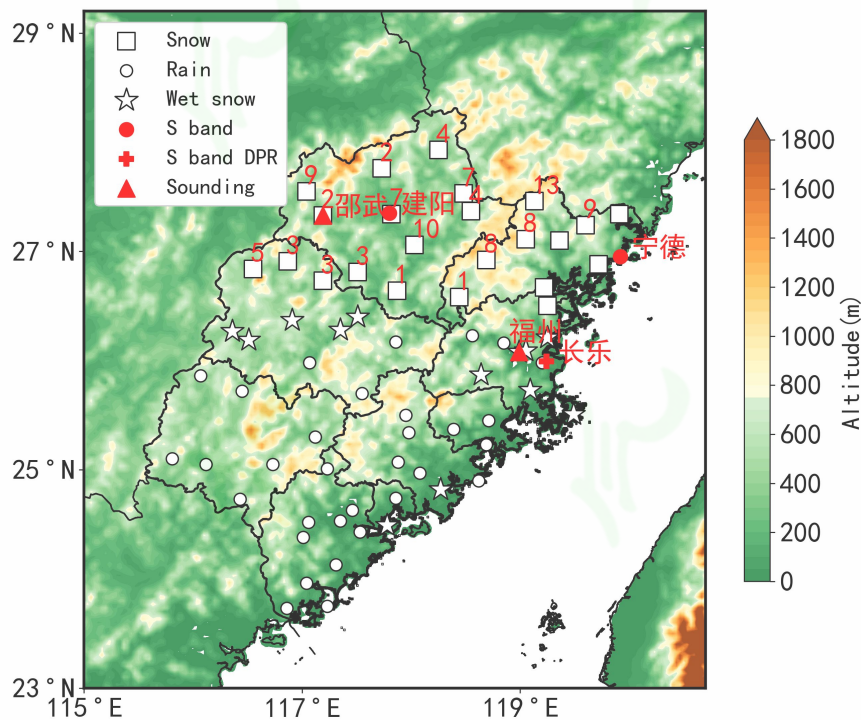


图 2 2022 年 2 月 19 日 20 时-23 日 08 时福建天气实况（雪、雨夹雪和雨）、探空站(三角形)和雷达站（红点表示 S 波段单偏振雷达，加号表示 S 波段双偏振雷达）的地理位置，彩色阴影表示地形高度，图中数字表示整个过程的积雪深度(单位:cm)

Figure 2. Surface observation (snow, wet snow and rain) of Fujian from 2000 BJT (Beijing Time) on19 Feb. to 0800 BJT on 23 Feb. 2022. Red dots represent S band weather radars, cross symbol represents S band dual-polarization radar (DPR) and triangles represent sounding sites. Shadings indicate topography (units: m). Red

Arabic numerals indicate accumulated snow depth during the same period of time (units:cm)

3.2 天气形势

从 2022 年 2 月 20 日 20 时和 21 日 08 时 500hPa 高空天气形势（图 3a、d）来看，西南地区南支槽稳定为降雪提供了良好的大尺度动力抬升条件。20 日 20 时 700hPa（图 3b）福建地区受暖湿气流影响有暖平流，850hPa（图 3c）受偏北风转东北风的回流冷空气影响有较强冷平流，低层湿度较大且湿层深厚。到 21 日 08 时 700hPa（图 3e）和 850hPa（图 3f）的暖平流和冷平流都有所减弱。从地面场来来看（图 3g-i），本次过程的冷高压南压至较低纬度（约 32°N），冷高压底部的锋面压在福建北部，北部沿海地区等压线保持东北西南走向，引导变性冷空气沿东北路径从海上回流影响福建。

以上分析表明，本次过程动力和水汽条件较好，过程期间福建西北部和北部的高海拔山区气温接近或低于 0°C，有利于出现降雪，而北部沿海和中部地区气温维持在 2-6°C，处于纯雪和雨夹雪分界地带，各地区出现纯雪和雨夹雪的时间段不同。低层冷空气垫、中层暖湿气流以及地面气温差异的影响增加了本次降雪过程预报的不确定性。

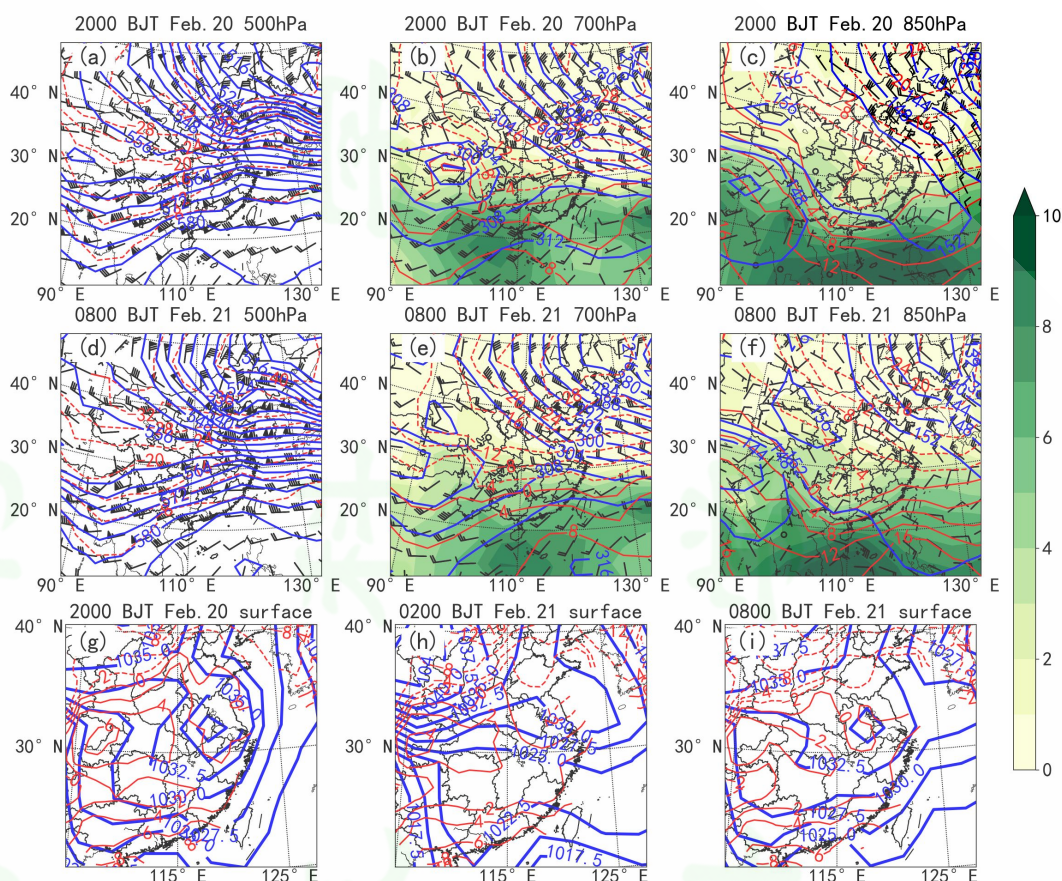


图3 2月20日20时500hPa (a) 位势高度 (蓝色等值线, 单位: dagpm)、温度 (红色等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和水平风场 (风羽, 单位: m s^{-1}), 700hPa (b) 和 850hPa (c) 位势高度 (蓝色等值线, 单位: dagpm)、温度 (红色等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、水平风场 (风羽, 单位: m s^{-1}) 和比湿场 (彩色阴影, 单位: g kg^{-1}), d、e、f 分别同 a、b、c, 时间为 21 日 08 时; 20 日 20 时 (g)、21 日 02 时 (h) 和 21 日 08 时 (i) 海平面气压 (蓝线, 单位: hPa) 和地面 2 米气温 (红线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)

Figure 3. 500hPa (a) geopotential height (blue contours, units: dagpm), temperature (red contours, units: $^{\circ}\text{C}$) and wind (barbs, units: m s^{-1}), 700hPa (b) and 850hPa (c) geopotential height (blue contours, units: dagpm), temperature (red contours, units: $^{\circ}\text{C}$), wind (barbs, units: m s^{-1}) and specific humidity (shadings, units: g kg^{-1}) on 2000 BJT 20 Feb. , d, e, f as in a, b, c respectively, but on 0800 BJT 21 Feb. Sea level pressure (blue contours, units: hPa) and 2 m temperature (red contours, units: $^{\circ}\text{C}$) on 2000 BJT on 20 Feb. (g) , 0200 BJT (h) and 0800 BJT (i) on 21 Feb.

研究表明, 地面降水类型与热力廓线存在紧密内在联系, 当温度廓线上是深厚的冷层时, 地面出现纯雪, 当中层存在暖层低层有冷空气垫时, 则视暖层和冷层的深浅和强度不同, 地面可能出现湿雪或冻雨等, 因此, 温度垂直廓线结构和地面湿球温度的大小可作为地面降水类型的判断指标 (Zerr, 1997; Schuur et al. 2012)。本次热力廓线也存在类似的结构, 20 日 20 时邵武和福州站 (图 4a、b) 的共同点是受西南暖湿气流影响, 700hPa 附近有相对暖层, 福州站的暖层强度更强, 800-950hPa 都存在冷层, 对应低层回流冷空气的影响。21 日 08 时邵武和

福州站（图 4c、d）700hPa 附近风向分别转为偏西风和西北风，暖层减弱，而低层也随着东北风转偏东风使得冷层也减弱，福州站 700-900hPa 之间温度较为均匀，徘徊在 0℃附近，邵武站虽然冷层减弱，但 900hPa 附近还存在较浅薄的冷层。

综合以上分析可知，此次过程的天气形势特征是动力抬升条件好，水汽充沛，热力廓线上同时存在暖层和冷层，并且暖层和冷层的强度以及地面气温随时间发生较大变化，加大了地面降水类型的预报难度。

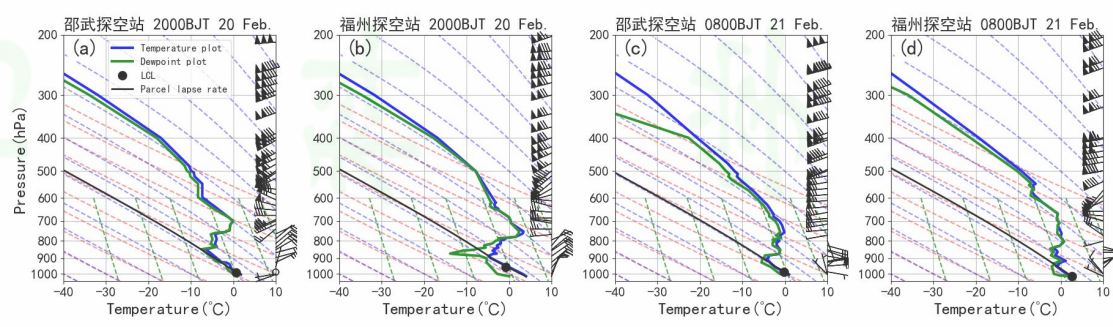


图 4 2 月 20 日 20 时邵武 (a) 和福州 (b)、21 日 08 时邵武 (c) 和福州 (d) 探空曲线，蓝色实线、绿色实线和黑色实线分别温度层结曲线、露点温度曲线和状态曲线，黑点表示抬升凝结高度，绿色虚线、红色虚线和蓝色虚线分别表示等饱和比湿线、干绝热线和湿绝热线。

Figure 4. a,b,c,d represent Skew-T log-P plots at Shaowu and Fuzhou sounding stations on 2000 BJT 20 Feb. and 0800 BJT 21 Feb. . Blue, green and black solid lines represent temperature plots, dewpoint plots and parcel lapse rates,respectively. Black dots indicate lifting condensation level (LCL), green, red and blue dash lines represent constant mixing ratio, dry adiabats and moist adiabats, respectively.

4 转折性降雪天气系统的垂直特征分析

4. 1 基于单偏振雷达的降水相态转变特征分析

根据前文给出的探空站与雷达站相对位置，邵武站探空曲线可代表建阳雷达观测区域的大气垂直温湿状态，同时结合地面湿球温度、实况观测和降水类型分类结果对雷达观测区域的纯雪和湿雪时间段进行区分，分析不同阶段的反射率因子廓线特征演变。

4. 1. 1 纯雪和湿雪时间段划分

图 5a 给出 20 日 17 时至 21 日 10 时地面区域自动站逐小时湿球温度经 Cressman 插值网格化后在雷达最低仰角 (0.48°) PPI 径向 60km 范围内的投影，下文中雷达观测范围仅指雷达径向 60km 范围。邵武（海拔 221m）、武夷山（海

拔 192m) 和建瓯 (海拔 156m) 三站分布在雷达的不同方位角和斜距上, 海拔高度也比较一致。由图 5a 可知, 雷达观测范围内地面湿球温度均小于 2°C , 雷达东侧湿球温度小于 0°C , 08 时之后湿球温度整体回升, 总体上地面气温分布较为均匀, 因此, 三个站点可大致表征雷达观测范围内整体降水类型分布情况。

图 5b-d 给出武夷山、邵武和建瓯三站基于雨滴谱仪的降水类型分类结果, 其中武夷山 20 日 21 时-21 日 08 时出现持续降雪, 08-09 时转雨夹雪; 邵武 20 日 18 时-22 时出现雨夹雪, 22 时-21 日 08 时降雪, 08-09 时转雨夹雪, 之后转雨; 建瓯 20 日 18 时-22 时出现雨夹雪, 22 时-21 日 07 时转为降雪, 07-08 时降水类型在雪和雨夹雪之间波动, 08 时之后转雨。也就是说 20 日 18 时-21 时和 22 时-21 日 08 时两个时段雷达观测范围内分别出现持续的雨夹雪和纯雪。

从三个站点降水类型和地面湿球温度演变 (图 5) 还可以看出, 当地面湿球温度大于 2°C 时地面以降雨为主, 2°C 附近时则可能出现雨或雨夹雪, 当湿球温度更低时地面则以纯雪为主, 因此在雷达观测范围内, 可将地面湿球温度小于 2°C 作为雨和雪的区分指标 (Zerr 1997; Schuur et al. 2012)。

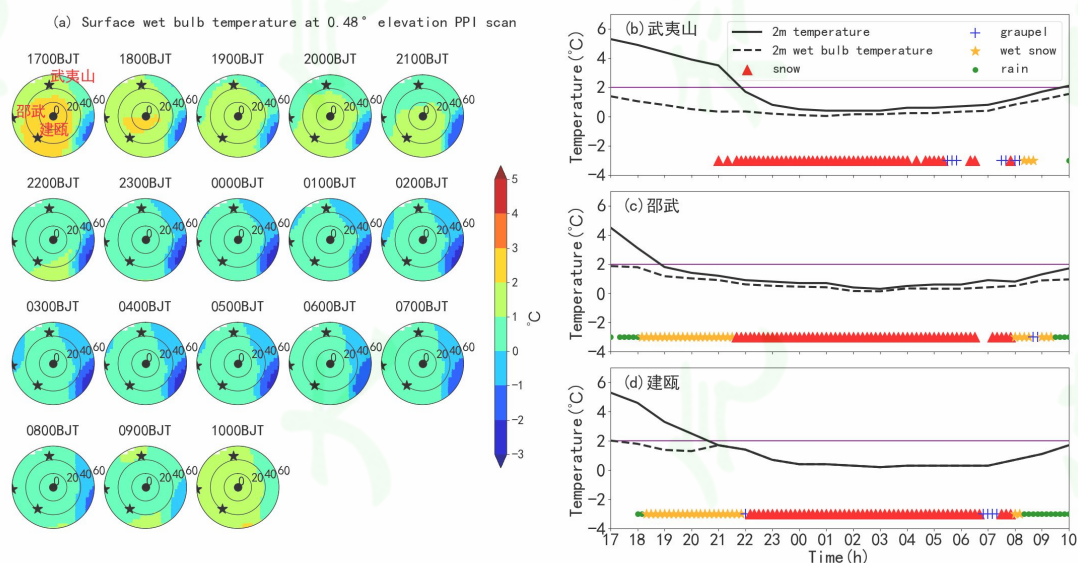


图 5 20 日 17 时-21 日 10 时逐小时的雷达 0.48° 仰角 PPI 对应的地面湿球温度 (a, 彩色阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$), 图中星号表示武夷山、邵武和建瓯基本气象观测站的位置。武夷山 (b)、邵武 (c) 和建瓯 (d) 基于降水粒子谱数据的降水类型分类结果、地面 2m 气温和地面湿球温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Figure 5. Hourly surface wet bulb temperature (a, shadings, units: $^{\circ}\text{C}$) at 0.48 elevation PPI scan from 1700 BJT 20 Feb. to 1000 BJT 21 Feb., asterisks indicate location of Wuyishan, Shaowu and Jian'ou station. Precipitation types at Wuyishan (b), Shaowu (c) and Jian'ou (d) station with 2m temperature and wet bulb temperature (units: $^{\circ}\text{C}$)

4.1.2 纯雪和雨夹雪阶段 VPR 特征分析

根据以上地面湿球温度的指标计算降纯雪和雨夹雪时段雷达观测区域的 VPR (图 6), 方法 (Zhang et al. 2008) 如下: (1) 选取雷达径向 20-60km 环形区域, 将降水回波分为对流性和层状云降水, 计算不同回波类型的 VPR, 本个例是冬季降雪天气过程, 无对流特征, 都为层状云降水; (2) 垂直高度设置为 0-10km, 垂直分辨率 200m, 对每一个高度层区间, 搜索雷达 20-60km 环形区域内所有仰角上, 同类型降水回波的波束中心高度满足该高度层的有效反射率因子数据 ($>2\text{dBZ}$); (3) 当某个高度层区间内有效反射率因子数据小于 10 个时, 该层赋为缺失值, 反之, 对落在该区间的反射率因子数据求平均; (4) 对垂直廓线进行 11 点滑动平均。该方法可以避免雷达近距离地物杂波的干扰, 同时减少雷达远距离波束展宽带来的影响, 且一定程度上反映出反射率因子的平均垂直特征。

由前文可知, 建阳雷达观测范围内降纯雪和雨夹雪的时间界限较为清晰, 因此, 20 日 18 时-21 时和 22 时-21 日 08 时两个时段反射率因子廓线分别代表雨夹雪和纯雪的垂直特征。从图 6a-e (雨夹雪阶段) 可知, 3km 附近存在明显的融化层亮带特征, 表明冰晶粒子在下降过程中融化成液态, 当粒子下落到 900hPa 附近的冷层 (见图 1a 和图 4a) 又发生部分或完全冻结, 此时地面气温还比较高, 地面以雨夹雪为主。图 6f-n (降雪阶段) 中, 3km 附近反射率因子显著增强的特征逐渐消失, 转为随高度下降反射率因子递增, 表明随着中层暖层减弱和地面气温降低 (见图 1a 和图 4c), 粒子的融化作用减弱, 主要以冰相存在, 下落过程中通过聚并增长, 低层反射率因子逐渐增大。07-08 时, 虽然地面气温仍较低, 但随着高空天气形势转变, VPR 也从随高度下降单调递增转为中层具有融化层亮带的廓线特征, 表明降雪过程逐渐减弱 (图 6o)。对比图 1 和 4 中邵武站探空曲线, 雷达 VPR 演变过程中反映出的融化层所在高度和中层暖层随时间减弱等特征与观测实况十分吻合, 且由于雷达观测频率更高, 可以更精细地反映出零度层的变化。

以上分析表明, 当地面气温和地形分布较为均匀时, 结合 VPR 以及高空温度演变, 可以清晰地判断出雨夹雪和纯雪二者转换的分界点, 纯雪阶段反射率因子廓线单调递增, 雨夹雪阶段受中层暖层影响出现反射率因子显著增大的亮带特

征。

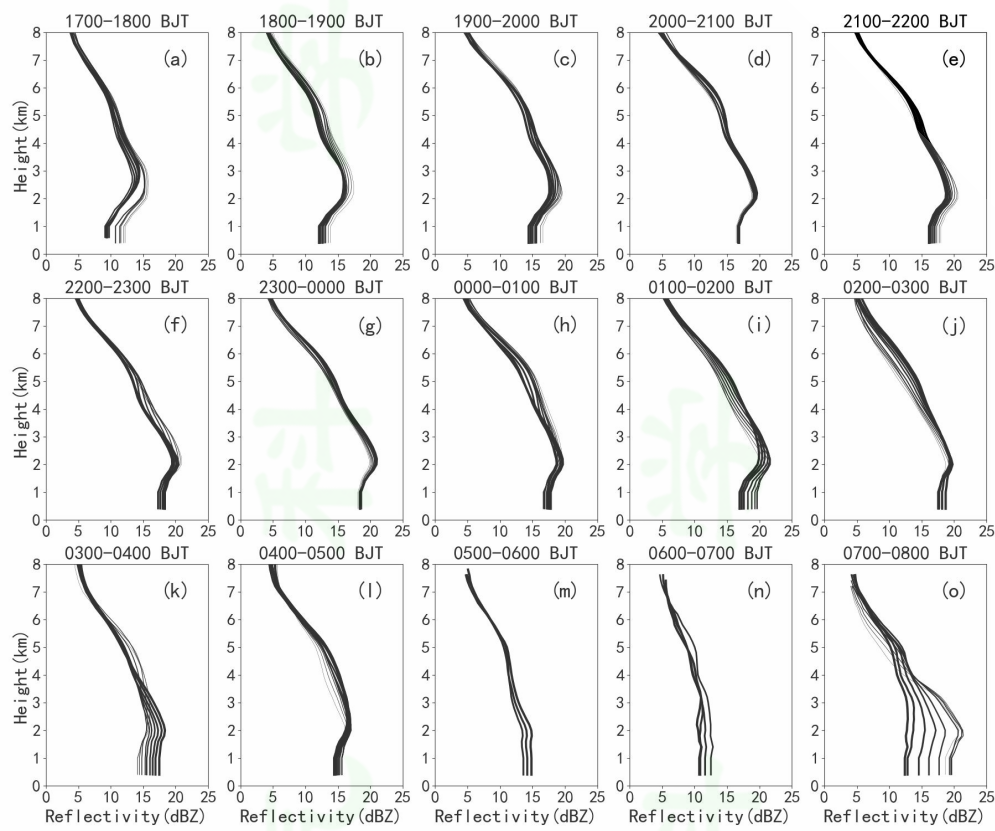


图 6 20 日 17 时-21 日 10 时建阳雷达径向 20-60km 反射率因子垂直廓线演变，1h 时间窗内，廓线的线粗随时间逐渐递减

Figure 6. Evolution of VPR of snow and wet snow areas within slant range 20-60km of Jianyang radar from 1700 BJT Feb. 20 to 1000 BJT Feb. 21. Line width of VPR decreases with time within 1h window

4.1.3 降雪（纯雪和雨夹雪）区域划分

与前文类似，福州站探空曲线可近似代表宁德雷达观测区域的大气垂直温湿状态。宁德雷达观测区域的情况与建阳雷达有所不同，其雷达观测覆盖的西北部由于海拔较高，以纯雪为主，而其他区域则存在纯雪和雨夹雪转换过程，整个雷达观测区域内纯雪和雨夹雪的时间段无法完全区分开，因此，宁德雷达 VPR 计算时仅对雨和雪进行区分，虽然其对应的地面降水类型同时包含了纯雪和雨夹雪，但是反映了粒子空中下落阶段的整体特征。

从图 7a 可以看出，宁德雷达西北侧海拔较高，地面湿球温度较低(小于 0°C)，西南侧边缘地区湿球温度前期大于 2°C ，随时间演变湿球温度下降至 2°C 以下，至 21 日 07 时逐渐回升。如图 7b-e 所示，柘荣由于海拔高度较高（684m）出现持续较长时间的纯雪，而福安（海拔 50m）、福鼎（海拔 36m）和霞浦（海拔

57m) 三站以雨夹雪为主，纯雪时段较短。

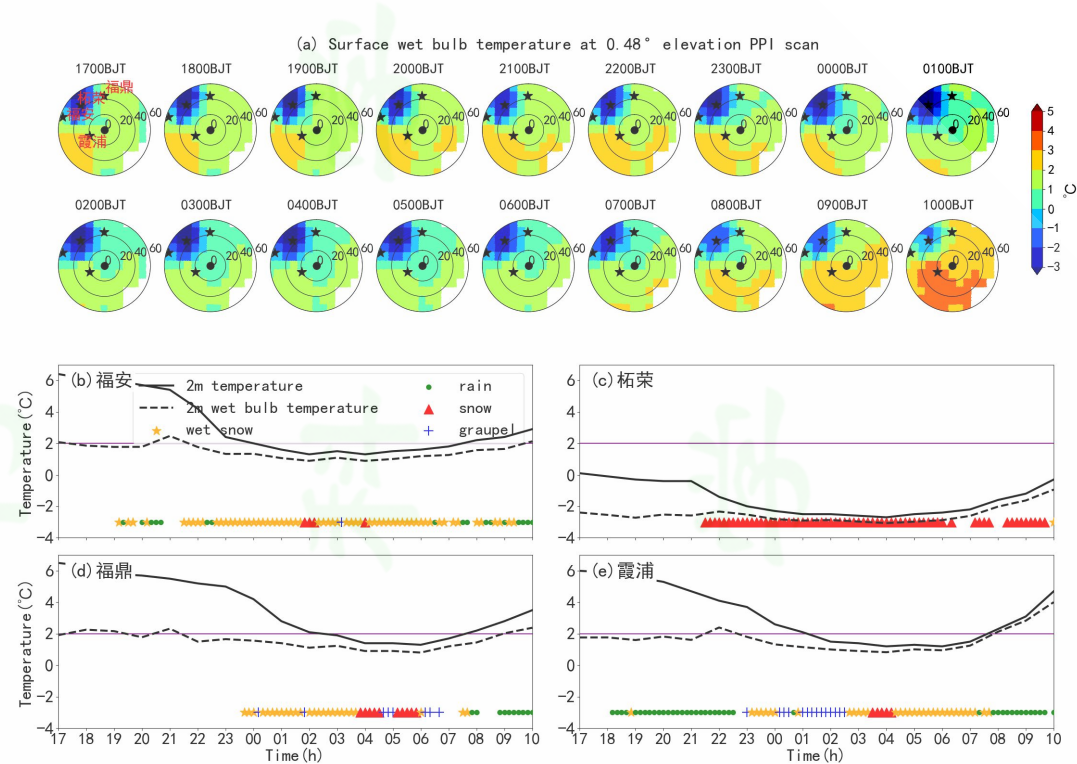


图7 20日17时-21日10时逐小时的雷达0.48°仰角PPI对应的地面湿球温度(a, 彩色阴影,单位:℃), 图中星号表示福安、福鼎、柘荣和霞浦基本气象观测站的位置。福安(b)、柘荣(c)、福鼎(d)和霞浦(e)降水类型分类结果、地面2m气温和地面湿球温度(单位:℃)

Figure 7. Hourly surface wet bulb temperature (a, shadings, units: °C) at 0.48 elevation PPI scan from 1700 BJT 20 Feb. to 1000 BJT 21 Feb. , asterisks indicate location of Fu'an, Fuding, Zherong and Xiapu station. Precipitation types at Fu'an (b), Fuding (c), Zherong (d) and Xiapu (e) station with 2m temperature and wet bulb temperature (units: °C)

4.1.4 降雪（纯雪和雨夹雪）区域的VPR特征分析

根据地面湿球温度小于2℃的指标，以图6相同方法计算宁德雷达降雪区域的VPR（图8）。其垂直廓线演变特征与建阳雷达的类似，前期（图8a-g）在融化层亮带附近反射率因子突增，之后转为随高度降低单调递增（图8h-n），表明中层暖层强度减弱，受低层冷层和地面气温降低影响，该阶段降雪强度最强；07-08时（图8o）由于地面气温回升和高空天气形势转变，纯雪或雨夹雪的区域减小，垂直廓线也由单调递增转为一般层状云降水特征。

对比图6和图8以及两个雷达观测区域的地面降水类型演变（图5b-d和图7b-e）可知，虽然1km附近及以上高度的VPR演变特征非常接近，但是在宁德雷达观测区域内除了高海拔山区出现持续性纯雪，其他区域仅短暂出现纯雪，以

雨夹雪为主。一方面是因为宁德雷达观测范围地面湿球温度更高，对近地面粒子的融化作用更强，另一方面从图 1 中邵武和福州探空站湿球温度廓线演变来看，两个地区中层暖层和低层冷层都减弱，但是建阳雷达到 21 日 08 时 900hPa 附近仍存在浅薄的冷层，融化层以下粒子在低层的重新冻结作用仍较强，因此该地区出现持续性纯雪，而宁德雷达观测范围则由于低层冷层显著减弱，低海拔地区地面以雨夹雪为主，由此突出了在转折性降雪过程中低层环境温度场演变对降水变化的重要性。造成粒子空中下落阶段的 VPR 垂直特征相似但地面降水类型不同的原因可能是建阳雷达低仰角地物遮挡严重，而宁德雷达架设高度也较高，两部雷达都无法精细地反映低层环境温度和降水特征的变化。

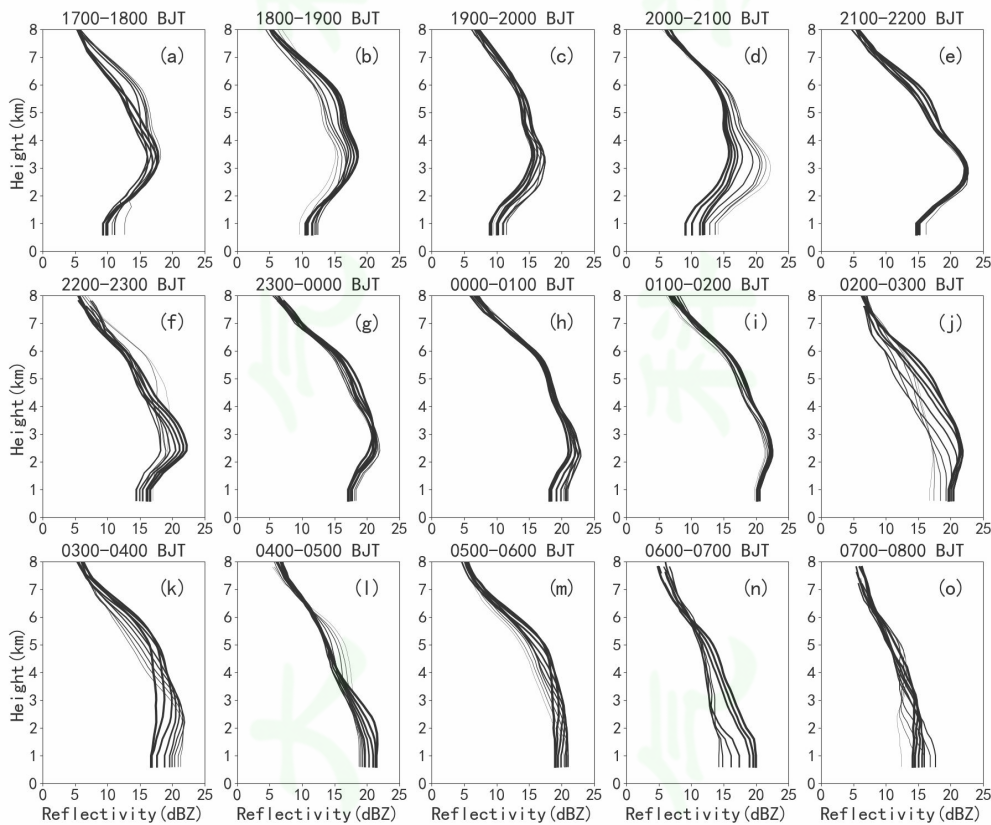


图 8 20 日 17 时-21 日 10 时宁德雷达径向 20-60km 反射率因子垂直廓线演变，1h 时间窗内，廓线的线粗随时间逐渐递减

Figure 8. Evolution of VPR of snow and wet snow areas within slant range 20-60km of Ningde radar from 1700 BJT Feb. 20 to 1000 BJT Feb. 21. Line width of VPR decreases with time within 1h window

4.2 基于双偏振雷达的微物理特征分析

长乐 S 波段双偏振雷达的雷达参量为本次福州地区的纯雪和雨夹雪天气提供更丰富的信息，由于其观测范围内降水类型差异较大，仅在小部分区域出现纯雪

和雨夹雪，且以雨夹雪为主，因此采用有限方位角平均的 QVP 分析其垂直结构特征。图 9a 给出罗源站地面降水类型演变，降雪时段主要出现在 03-07 时，值得注意的是，其中部分时间段降水类型分类方法得出的结果是霰，而霰是冰晶下落过程中碰撞过冷水滴并冻结，且这样的淞附过程足够强时形成的固态降水类型（Knight and Knight 1973; List and Schemenauer 1971; Locatelli and Hobbs 1974; Magono and Lee 1966）。受观测条件限制无法核实该分类结果，且根据台站人工观测报告该时间段出现的是雪和雨夹雪，因此以人工观测为准。

图 9b-1 给出 21 日 03-07 时逐小时罗源站所在方位角 $\pm 5^\circ$ 区间 19.8° 仰角的 Z_H 、 Z_{DR} 和 ρ_{hv} 的 QVP 特征。从图中可以看出， Z_{DR} 和 ρ_{hv} 的逐小时平均和单个体扫廓线的一致性较好，而 Z_H 的离散度较大，原因可能是 Z_H 是与粒子数浓度有关的参量，由于平均的方位角区域较小， Z_H 强度空间分布不均匀以及回波自身移动造成 Z_H 廓线的波动较大。 Z_{DR} 和 ρ_{hv} 是与粒子形状等因素有关的参量，因此当粒子属性变化不大时，其廓线特征较为稳定。在 $-10\sim-15^\circ\text{C}$ 高度区间，一个共同的特点是 Z_H 从很小的值开始增大， Z_{DR} 突增和 ρ_{hv} 显著减小，这是枝状冰晶增长的特征（Kennedy and Rutledge 2011; Andrić et al. 2013; Griffifin et al. 2014; Moisseev et al. 2015; Schrom et al. 2015; Kumjian et al. 2016; Kumjian and Lombardo 2017; Griffifin et al. 2018），在融化层以上， Z_H 继续增大， Z_{DR} 接近于 0dB， ρ_{hv} 增大，表明此时冰晶聚并增长，粒子直径增加、形状近乎球形，以上枝状冰晶增长和融化层以上粒子的聚并增长过程与一般纯雪过程类似。转折性降雪与纯雪过程的微物理特征差异主要体现在中下层，当粒子下落到暖层后雷达观测出现明显的融化层亮带特征，即由于固态向液态转变过程中粒子介电常数、形状和下落速度等发生改变，出现 Z_H 和 Z_{DR} 增大、 ρ_{hv} 减小现象；融化层（2.5km 高度附近）以下，受低层冷空气层影响以及地面气温的下降（从 $3-4^\circ\text{C}$ 下降至 $1-2^\circ\text{C}$ ），液态粒子部分或完全冻结，通过聚并增长过程，形状趋于规则球形，表现为 Z_H 有所增加， Z_{DR} 减小至近于 0dB， ρ_{hv} 增大。

从以上分析可知，转折性降雪过程的复杂性主要体现在受暖层和冷层影响下的粒子垂直增长过程，福州地区由于低层冷层强度和厚度不如福建西北部，暖层以下粒子主要是出现部分冻结，而地面湿球温度较低也不会使粒子完全融化，因此该地区以雨夹雪为主。值得注意的是，由于雷达天线馈源海拔高度 642m，而

低层冷层强度最强时段高度也在 800-900m 附近，随后高度降低且强度减弱，因此雷达无法反映低层冷层附近降水特征变化，需结合温度背景场对降水粒子的变化进行判断。

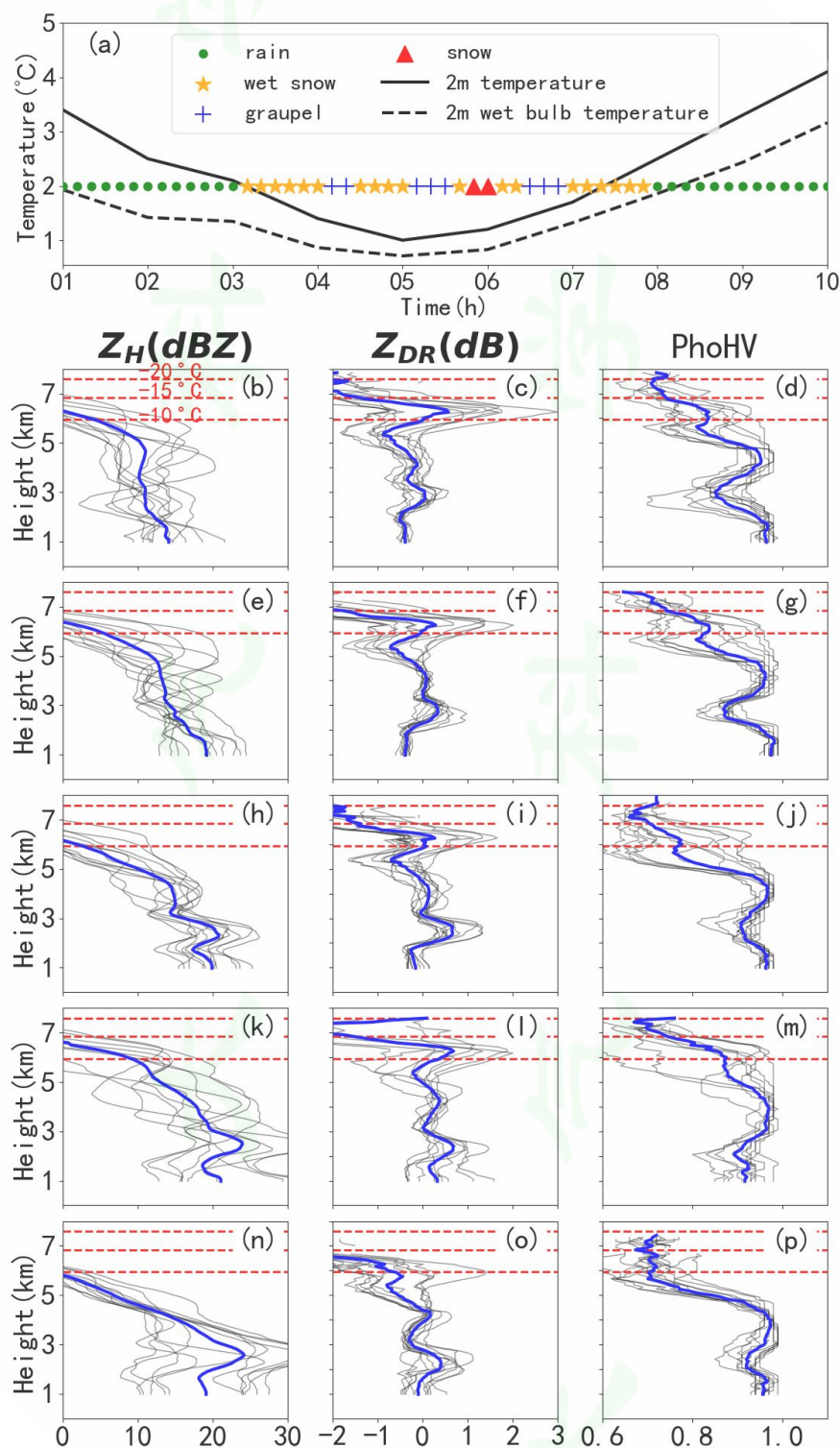


图 9 21 日 01 时-10 时罗源站降水类型分类结果和地面 2m 气温和 2m 湿球温度 (a, 单位:°C) ; 21 日 03-04 时 19.8° 仰角罗源站所在方位角 $\pm 5^\circ$ 区间平均的 Z_H (b) 、 Z_{DR} (c) 和 ρ_{hv} (d) QVP, efg、hij、klm 和 nop 依此类推, 分别代表 04-05 时、05-06 时、06-07 时和 07-08 时, 图中灰线表示该小时内 6min 体扫

的廓线，蓝色粗线表示该小时内平均廓线，三条红色虚线从高到底分别表示-20、-15和-10℃等温线高度

Figure 9. Precipitation types with 2m temperature and wet bulb temperature (a, units: $^{\circ}\text{C}$) at Luoyuan from 0100 to 1000 BJT 20 Feb. . Averaged Z_H (b), Z_{DR} (c) and ρ_{hv} (d) QVP within 10° azimuth range centered on azimuth where Luoyuan station locates at 19.8° elevation on 0300-0400 BJT 21 Feb. , efg, hij, klm and nop as in abc, but on 0400-0500, 0500-0600, 0600-0700 and 0700-0800 BJT, respectively. Grey lines indicate QVPs of radar variables at 6min interval within the corresponding hour, blue thick lines represent the mean QVPs within the hour, three red dash lines represent the heights of -20°C , -15°C and -10°C from the top to the bottom

与雷达垂直廓线特征相比，RHI 剖面没有经过大范围区域平均，可以更精细地展现天气系统的垂直结构特征，雷达参量垂直结构特征反映的环境温度变化有助于地面降水类型的判断。图 10 给出 21 日 01 时 04 分（降雨）和 06 时 04 分（降雪）罗源站方位角 $\pm 10^{\circ}$ 范围内平均的雷达参量 RHI 和 FJ-WRF 温度场的垂直剖面，图中融化层亮带和高层冰晶增长特征与前文描述类似，低仰角较远距离由于波束展宽，融化层影响的垂直宽度更大。对比 01 时 04 分（图 10a-c）和 06 时 04 分（图 10d-f）可知，融化层亮带的厚度变窄， Z_{DR} 增强的幅度和区域也减小，表明暖层影响减弱，且此时地面气温也降低，有利于地面出现降雪。值得注意的是，根据图 4b、d 中福州站的探空曲线，中层暖层的确有所减弱，雷达参量垂直剖面上暖层减弱的特征很好地反映出了环境温度场的变化，但是模式温度场（图 10 中等值线）在该时段该高度上并没有精准地反映出暖层减弱的特征，因此，双偏振雷达参量垂直特征反映的环境温度变化信息可以作为模式精准预报和高时空分辨率垂直廓线探测缺失情况下的有效补充。

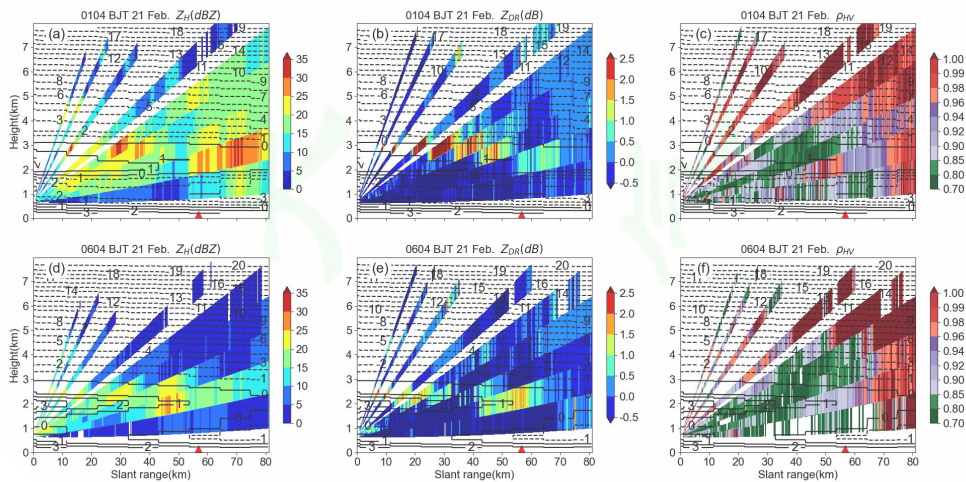


图 10 21 日 01 时 04 罗源站所在方位角 $\pm 10^{\circ}$ 平均的 Z_H (a, 单位: dBZ)、 Z_{DR} (b, 单位: dB) 和 ρ_{hv} (c) RHI 叠加 FJ-WRF 温度场垂直剖面, d、e、f 分别同 a、b、c, 时间为 21 日 06 时 04 分, 图中三角形表示罗源站所在距离

Figure 10. RHI of averaged Z_H (a, unit: dBZ) , Z_{DR} (b, units: dB) and ρ_{hv} (c) within $\pm 10^{\circ}$ azimuthal range centered azimuth where Luoyuan station locates on 0100 BJT 21 Feb. overlapped with cross section of

temperature interpolated from FJ-WRF, d, e, f as in a, b, c, respectively, but on 0604 BJT 21 Feb. Triangle indicates the range of Luoyuan station

5 总结和讨论

此次转折性降雪天气过程的天气形势特点是中层暖层和低层冷层并存，各地区复杂的温度层结变化和地面气温差异使地面出现雨、雨夹雪和纯雪多种降水现象，加大了预报难度。本文通过基于粒子谱数据的降水类型分类方法，对各地区出现纯雪和雨夹雪出现的时间段进行划分，并结合天气观测资料、模式预报和多部天气雷达，分析了环境温度变化尤其是低层温度层结变化对转折性降雪的影响以及转折性降雪天气的垂直特征，主要得到以下结论：

(1) 地面气温和地形分布均匀时，可以通过 VPR 和高低空环境温度场特征判断雨夹雪和纯雪之间的转换，即纯雪阶段 VPR 随高度降低单调递增，雨夹雪阶段 VPR 中层存在融化层亮带特征。宁德和建阳雷达 1km 高度以上的 VPR 特征相似，但是其纯雪和雨夹雪的持续时间和空间分布显著不同，原因是两个区域低层温度层结和地面气温有明显差异，而雷达受观测环境限制，无法完全反映出近地层环境温度差异引起的降水特征变化，因此，在转折性降雪过程的分析和预报中应特别关注低层和地面温度演变以及雷达对近地层降水的观测能力。

(2) 福州地区降雪粒子的增长特征表明，转折性降雪过程高层和融化层高度以上的粒子增长机制与一般纯雪过程类似，即-10~-15℃高度之间枝状冰晶显著增长，融化层以上粒子通过聚并过程增长，不同点在于转折性降雪受中层暖层和低层冷层影响，粒子经历了复杂的融化和冻结过程，粒子下落到暖层时出现融化层亮带特征，融化层以下则视低层冷层强度和厚度以及地面气温的不同，粒子发生完全或部分冻结，地面可能出现纯雪或雨夹雪。此外，雷达参量垂直特征能够实时地反映环境温度变化，例如 0℃层附近 Z_H 和 Z_{DR} 增强带减弱表明暖层减弱，有利于地面出现降雪，这在一定程度上弥补了模式预报能力不足和高时空分辨率大气垂直廓线观测欠缺的问题。

对比本次过程的单偏振和双偏振雷达参量特征可知，由于双偏振雷达能够提供粒子大小和形状等信息，在降水微物理特征研究方面具有明显的优势。由于福建地区降雪天气并不十分常见，此次转折性降雪天气过程中针对降雪的观测设备有所欠缺，例如缺乏称重降水传感器、针对冬季固态降水粒子形态和结构观测的

显微镜照相等。降水现象仪也在过程中出现错误的降水现象判别,虽然启动了人工观测,仍造成降雪时段和降雪类型实况资料不够精确的问题。文中针对转折性降雪天气的雷达参量垂直特征进行分析,为降雪天气诊断提供了一些有用的信息,但是对于降雪过程更精细的微物理特征包括冰晶增长机制和淞附过程等,环境场对纯雪和湿雪转换的影响,以及二者转换过程呈现的不同特征和物理机制,仍需多种观测设备(例如二维雨滴谱仪、微雨雷达和云雷达等)的数据分析以及粒子散射模型和数值模式的验证。

致谢: 感谢为本文提供 FJ-WRF 数据和过程实况总结的福建省气象台潘宁首席和林金淦首席。

参考文献(references)

- Andrić J, Kumjian M R, Zrnić D S, et al. 2013. Polarimetric signatures above the melting layer in winter storms: An observational and modeling study [J]. 52:682-700. DOI: 10.1175/JAMC-D-12-028.1
- Allabakash S, Lim S, Chandrasekar V, et al. 2019. X-band dual-polarization radar observations of snow growth processes of a severe winter storm: case of 12 December 2013 in South Korea [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 36:1217-1235. DOI: 10.1175/JTECH-D-18-0076.1
- Brandes E A, Zhang G F, Vivekanandan J. 2002. Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 41:674-685.
doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0674:EIREWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0674:EIREWA>2.0.CO;2)
- Brandes E A, Ikeda K, Zhang G F. 2007. A statistical and physical description of hydrometeor distributions in Colorado snowstorms using a video disdrometer [J]. J. Appl. Meteor. Climatol. 46: 634-650.
<https://doi.org/10.1175/JAM2489.1>
- 陈刚, 2019. 华东地区中尺度强降水对流系统的微物理结构观测与数值模拟研究 [D]. 南京大学.
- Chen Gang, 2019. The observed and simulated study for the microphysical characteristics of the meso-scale convective systems with intense rainfall in Eastern China [D]. Nanjing University.
- Doviak, R J and Zrnić D S, 1993. Doppler Radar and Weather Observations. Academic Press, 562 pp.
- Griffin E M, Schuur T J, Ryzhkov V A, et al. 2014. A polarimetric and microphysical investigation of the Northeast blizzard of 8-9 February 2013 [J]. Wea. Forecasting, 29:1271-1294.
<https://doi.org/10.1175/WAF-D-14-00056.1>.
- Griffin E M, Schuur T J. 2018. A polarimetric analysis of ice microphysical processes in snow, using quasi-vertical profiles [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 57: 31-50. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0033.1>.
- 高茜, 郭学良, 刘香娥, 何晖. 2020. 北京北部山区两次降雪过程微物理形成机制的观测-模拟研究 [J]. 大气科学, 44(2): 407-420. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18172
- Gao Qian, Guo Xueliang, Liu Xiang'e, He Hui. 2020. Numerical simulation and observation study on microphysical formation processes of two different snowfall cases in northern mountain area of Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, 44(2): 407-420. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18172
- Houze R A Jr, 2014. Cloud Dynamics [M]. Academic Press, 573 pp.

- 黄钦, 牛生杰, 吕晶晶, 等. 2018. 庐山一次积冰天气过程冻雨滴谱及下落末速度物理特征研究 [J]. 大气科学, 42 (5): 1023-1037. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1711.17158.
- Huang Qin, Niu Shengjie, Lü Jingjing, et al. 2018. Physical characteristics of freezing raindrop size distribution and terminal velocity in two ice weather cases in Lushan area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 42 (5): 1023-1037. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1711.17158.
- 黄钰, 郭学良, 毕凯, 等. 2020. 北京延庆山区降雪云物理特征的垂直观测和数值模拟研究 [J]. 大气科学, 44(2): 356-370. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18258
- Huang Yu, Guo Xueliang, Bi Kai, et al. 2020. Vertical observation and numerical simulation of the clouds physical characteristics of snow-producing over Yanqing mountain area in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 44(2): 356-370. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18258
- 胡宁, 符娇兰, 孙军, 等. 2021. 北京一次冬季极端降水过程中相态转换预报的误差分析 [J]. 气象学报, 79(2):328-339. doi:10.11676/qxxb2021.019
- Hu Ning, Fu Jiaolan, Sun Jun, et al. 2021. Errors in the forecast of precipitation type transition in an extreme winter precipitation event in Beijing. Acta Meteorologica Sinica, 79(2):328-339. doi:10.11676/qxxb2021.019
- 贾星灿, 马新成, 毕凯, 等. 2018. 北京冬季降水粒子谱及其下落速度的分布特征 [J]. 气象学报, 76(1): 148-159. <http://dx.doi.org/10.11676/qxxb2017.076>
- Jia Xingcan, Ma Xincheng, Bi Kai, et al. 2018. Distributions of particle size and fall velocities of winter precipitation in Beijing [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 76(1):148-159. <http://dx.doi.org/10.11676/qxxb2017.076>
- Knight C A, Knight N C. 1973. Conical graupel [J]. J. Atmos. Sci., 30: 118-124. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1973\)030,0118:CG.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1973)030,0118:CG.2.0.CO;2).
- Kennedy P C, Rutledge S A. 2011. S-band dual-polarization radar observations of winter storms [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 50: 844-858. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2558.1>.
- Kumjian M R, Ryzhkov A, Reeves H, et al. 2013. Dual-polarization radar observations of hydrometeor refreezing in winter storms [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 52: 2549-2566. doi:10.1175/JAMC-D-12-0311.1.
- Kumjian M R, Mishra S, Giangrande S E, et al. 2016. Polarimetric radar and aircraft observations of saggy bright bands during MC3E [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 121: 3584-3607. <https://doi.org/10.1002/2015JD024446>.
- Kumjian M R and Lombardo K A. 2017. Insights into the evolving microphysical and kinematic structure of northeastern U.S. winter storms from dual-polarization Doppler radar [J]. Mon. Wea. Rev., 145: 1033-1061. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0451.1>.
- List R, Schemenauer R S. 1971. Free-fall behavior of planar snow crystals, conical graupel and small hail [J]. J. Atmos. Sci., 28: 110-115. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1971\)028,0110:FFBOPS.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1971)028,0110:FFBOPS.2.0.CO;2).
- Locatelli J D, Hobbs P V. 1974. Fall speeds and masses of solid precipitation particles [J]. J. Geophys. Res., 79, 2185-2197. <https://doi.org/10.1029/JC079i015p02185>.
- Lee J E, Jung S H, Park H M, et al. 2015. Classification of precipitation types using fall velocity–diameter relationships from 2D-video distrometer measurements [J]. Adv. Atmos. Sci., 32: 1277-1290. doi: 10.1007/s00376-015-4234-4
- 刘梅, 俞剑蔚, 蒋义芳, 等. 2021. 2020 年 3 月 28 日沿江和苏南突发降雪多源监测特征及成因分析 [J]. 气象, 47(10): 1169-1181
- Liu M, Yu J W, Jiang Y F, et al. 2021. Multi-source monitoring characteristics and causes of a abrupt snowfall in southern Jiangsu on 28 March 2020 [J]. Meteor. Mon., 47(10): 1169-1181.
- 刘香娥, 何晖, 陈羿辰, 等. 2022. 北京地区一次降雪系统大气水凝物输送特征及降雪微物理机制的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 46(3): 507-519. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2110.20212

- Liu Xiang'e, He Hui, Chen Yichen, et al. 2022. Numerical simulation studies of atmospheric hydrometeor transportation characteristics and snowfall microphysical mechanism during a snowfall system in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 46(3): 507-519. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2110.20212
- Magono C, Lee C W. 1966. Meteorological classification of natural snow crystals [J]. J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., 2, 321-335.
- Moisseev D, Lautaportti S, Tyynela J, et al. 2015. Dual-polarization radar signatures in snowstorms: Role of snowflake aggregation [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 120:12644-12655. <https://doi.org/10.1002/2015JD023884>.
- Pruppacher H R, Klett J D. 1997. Microphysics of clouds and precipitation. 2nd ed [M]. Kluwer Academic, 954 pp.
- Pu K, Liu X, He H, Sun Y, et al. 2020. Microphysical characteristics of winter precipitation in Eastern China from 2014 to 2019 [J]. Water, 12(3): 920. <https://doi.org/10.3390/w12030920>
- Ryzhkov A, Zhang P, Reeves H. 2016. Quasi-Vertical Profiles-a new way to look at polarimetric radar data. J. Atmos. Oceanic Technol., 33:551-562. DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0020.1
- Schuur T J, Park H S, Ryzhkov A V, et al. 2012. Classification of precipitation types during transitional winter weather using the RUC model and polarimetric radar retrievals [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 51:763-779. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-091.1
- Schneebeil M, Dawes N, Lehning M, et al. 2013. High resolution vertical profiles of X-band polarimetric radar observables during snowfall in the Swiss Alps [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 52: 378-394. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-015.1>.
- 孙燕, 严文莲, 尹东屏, 等. 2013. 江苏冬季降水相态气候分布特征和预报方法探讨[J]. 气象科学, 33(3): 325-332.
- Sun Y, Yan W L, Yin D P, et al. 2013. Climatic characteristics and forecast of precipitation phase in winter of Jiangsu [J]. Meteor. Sci., 33(3): 325-332.
- Schrom R S, Kumjian M R, Lu Y. 2015. Polarimetric radar signatures of dendritic growth zones within Colorado winter storms [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 54: 2365-2388. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0004.1>.
- Trömel S, Kumjian M, Ryzhkov A, et al. 2013. Backscatter differential phase-Estimation and variability [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 52: 2529-2548. doi:10.1175/JAMC-D-13-0124.1.
- Trömel S, Ryzhkov A, Zhang P, et al. 2014. Investigations of backscatter differential phase in the melting layer [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 53:2344-2359. doi:10.1175/JAMC-D-14-0050.1.
- Trömel S, Ryzhkov A V, Hickman B, and Simmer C, 201. Climatology of the vertical profiles of polarimetric radar variables at X band in stratiform clouds. 38th Conf. on Radar Meteorology, Chicago, IL, Amer. Meteor. Soc., 5, <https://ams.confex.com/ams/38RADAR/webprogram/Paper320485.html>.
- Trömel S, Ryzhkov A, Hickman B, Muhlbauer K, and Simmer C, 2019. Polarimetric radar variables in the layers of melting and dendritic growth at X band—Implications for a nowcasting strategy in stratiform rain. J. Appl. Meteor. Climatol., 58: 2497-2522. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0056.1>.
- 陶然亭. 2020. 基于二维视频雨滴谱仪和双偏振雷达研究中国东部地区降雪微物理特征与降雪估计 [D]. 南京大学硕士学位论文.
- Tao Ranting. 2020. Snow microphysical characteristics and snowfall estimation in East China based on a 2D video disdrometer and dual polarization radar [D]. M. S. thesis, Nanjing University.
- Vignon É, Besic N, Jullien N, et al. 2019. Microphysics of snowfall over coastal East Antarctica simulated by Polar WRF and observed by radar [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124:11452-11476. <https://doi.org/10.1029/2019JD031028>
- Wallace J M, Hobbs P V, 2006. Atmospheric Science: An Introductory Survey [M]. Elsevier, 504 pp.

- 王东海, 柳崇健, 刘英, 等. 2008. 2008年1月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析 [J]. 气象学报, 3: 405-422. doi: 10.11676/qxxb2008.038
- Wang Donghai, Liu Congjian, Liu Ying, et al. 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the Southern China in January 2008 [J]. Acta Meteorologica Sinica, 3: 405-422. doi: 10.11676/qxxb2008.038
- 王东海, 端义宏, 刘英, 等. 2013. 一次秋季温带气旋的雨雪天气过程分析 [J]. 气象学报, 4: 606-627. doi: 10.11676/qxxb2013.060
- Wang Donghai, Duan Yihong, Liu Ying, et al. 2013. A case study of the mixed rainfall-snowfall event associated with an extratropical cyclone in autumn [J]. Acta Meteorologica Sinica, 4: 606-627. doi: 10.11676/qxxb2013.060
- 魏玮, 刘黎平, 吴翀, 等. 2019. 杭州“12·05”降雪天气过程的偏振雷达观测分析 [J]. 气象, 45(9): 1248-1261. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.09.006.
- Wei Wei, Liu Liping, Wu Chong, et al. 2019. Analysis of dual-polarization Radar Observation During the 5 December 2015 Snowfall Process in Hangzhou [J]. Meteorological Monthly, 45(9): 1248-1261. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.09.006.
- 武静雅, 毕永恒, 孙强, 等. 2021. 结合 Ka 和 X 波段双偏振雷达对北京一次锋面降雪过程雪带的观测分析 [J]. 大气科学, 45(5): 931-942. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20103
- Wu Jingya, Bi Yongheng, Sun Qiang, et al. 2021. Observation and analysis of snowband structure in a process of cyclone frontal snowfall in Beijing with Ka-band and X-band polarized radars [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 45(5): 931-942. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20103
- 许爱华, 乔林, 詹丰兴, 等. 2006. 2005年3月一次寒潮天气过程的诊断分析 [J]. 气象, 32(3): 49-55
- Xu A H, Qiao L, Zhan F X, et al. Diagnosis of a cold wave weather event in March 2005. Meteor. Mon. , 32(3): 49-55.
- Xu X Y, Howard K, Zhang J. 2008. An automated radar technique for the identification of tropical precipitation [J]. J. Hydrol. 9: 885-902. DOI: <https://doi.org/10.1175/2007JHM954.1>
- Zerr, R., 1997: Freezing rain: An observational and theoretical study [J]. J. Appl. Meteor., 36: 1647-1661.
- Zhang J, Langston C, Howard K. 2008. Bright band identification based on vertical profiles of reflectivity from the WSR-88D [J]. J. Atmos. Oceanic Technol. , 25: 1859-1872. DOI: <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1039.1>
- Zhang J, Qi Y C. 2010. A real-time algorithm for the correction of brightband effects in radar-derived QPE [J]. J. Hydrol., 11: 1157-1171. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010JHM1201.1>
- Zhang G F, Luchs S, Ryzhkov A, et al. 2011. Winter Precipitation microphysics characterized by polarimetric radar and video disdrometer observations in Central Oklahoma [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 50:1558-1570. DOI: <https://doi.org/10.1175/2011JAMC2343.1>
- 张哲, 戚友存, 李东欢, 等. 2022. 2021年郑州“7·20”极端暴雨雨滴谱特征及其对雷达定量降水估测的影响 [J]. 大气科学, 46(4): 1002-1016. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2201.21237
- Zhang Zhe, Qi Youcun, Li Donghuan, et al. 2022. Raindrop size distribution characteristics of the extreme rainstorm event in Zhengzhou 20 July, 2021 and its impacts on radar quantitative precipitation estimation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 46(4): 1002-1016. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2201.21237