

四川盆地东部一次局地强对流天气微物理特征分析

王智立^{1,2} 呼延李豆^{1,2} 高郁东^{1,2} 肖雲³

1 致灾降水数值模式与人工智能融合预报关键技术研究重点实验室, 重庆 401147

2 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147

3 重庆市长寿区气象局, 重庆 401220

摘要: 利用重庆 S 波段双偏振雷达观测、再分析资料和融合降水数据, 分析了 2021 年 8 月 8 日西南低涡背景下四川盆地东部局地强对流降水天气过程的微物理特征。结果表明: 在对流系统发展初期, 雷达反射率因子和偏振量开始增强, 中上层的冰相水凝物主要由雪粒子构成, 低层毛毛雨识别占比在 20%~40%, 雨滴粒子较小, 地面雨强较弱; 在对流系统快速发展阶段, 雷达反射率因子和偏振量增强较快, 出现高度超过 8 km 的 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱, 融化层以下液滴抬升形成过冷水并促进高层冰相过程发生, 高层霰粒子增加产生冰雹粒子, 伴随高层冰相粒子下落融化, 中低层出现高浓度、大粒径雨滴, 地面雨强快速增强; 随着对流系统减弱东移, 中高层霰粒子数量减少, 冰相粒子再次以干雪和湿雪为主, 中低层雨滴粒径和数量均减小, 地面雨强也随之变弱。双偏振参量观测、水凝物相态类型识别结果能够基本反映此次过程对流系统内部各水凝物之间的变换特征, 同时和地面雨强的变化特征匹配。

关键词: 双偏振雷达, 强对流, 微物理特征

Microphysical Characteristic of a Severe Convection Case in East Sichuan Basin

WANG Zhili^{1,2} HUYAN Lidou^{1,2} GAO Yudong^{1,2} XIAO Yun³

1 Key Laboratory of Core Tech on NWP-AI Integrated Forecast for Hazardous Precipitation, Chongqing 401147

2 Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147

3 Changshou Meteorological Administration, Chongqing 401220

收稿日期: XXXX-XX-XX; 定稿日期: XXXX-XX-XX

国家自然科学基金面上项目(42375161)、重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX0698)、重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2023TIAD-KPX0065)、重庆市气象局青年基金项目(QNJJ-202416)共同资助

第一作者: 王智立, 主要从事雷达资料应用与同化技术研究, E-mail: wangzl_98@qq.com

通讯作者: 高郁东, 主要从事雷达资料应用与同化技术研究, E-mail: stephencool@163.com

Abstract : A localized severe convective rainfall event over eastern Sichuan basin under the background of southwest vortex on 8 August 2021 was analyzed by using the Chongqing S-band dual-pol radar, ERA5 reanalysis data and CMPAS multi-source precipitation product. The results are as follow: At the early development of convection, radar observed some relative weak convective characteristics. Snow particles play a major role in ice-phase particles at middle-upper level. The proportion of drizzle identification ranges from 20% to 40%, raindrops' size and surface rain rate are both small. During the rapid intensification, radar measurements increased rapidly as well. Z_{DR} and K_{DP} columns can extend well above 8 km. Uplifted droplet generates supercooled water which facilitate ice-phase process over the melting layer. Melting of descending ice hydrometeors lead to the enhancement of liquid particles' size and concentration at low level, which intensified the surface rain rate. Convective cells were merged with each other and shift eastward subsequently. As the system weakened, dry and wet snow particles become the main component of ice-phase at middle-upper level again. Both size and number of liquid particles at middle-lower level are decreased and surface rainrate gets weakened accordingly. Dual-pol variables and hydrometeor identification can basically exhibit the characteristic of hydrometeor transformation within the convective systems and cohere reasonably with the variation of surface rain rate.

Key words : dual-polarization radar , , strong convective , microphysical characteristic

引言

受青藏高原东侧复杂地形及独特的气候特征影响,高原低涡、西南低涡以及低空切变线等天气系统活跃在我国西南地区(师锐等, 2014; 张静和孙羨, 2020; 程晓龙等, 2021),其中西南低涡(即西南涡)是导致四川盆地夏季强降水的主要天气系统(李国平, 2013; 韩林君和白爱娟, 2019)。西南涡总降水量主要来自对流性降水的贡献(蒋璐君等, 2015; 周玉淑等, 2019),同时西南涡东移也是诱发四川盆地东部局地强对流天气的重要原因(何光碧, 2012)。以往针对西南涡诱发局地强对流天气的研究大多聚焦在中尺度热动力结构和气候统计特征等方面(翟丹华等, 2014; 李跃清和徐祥德, 2016; 周春花等, 2022)。近年来,有研究表明局地强对流天气的发生发展与对流系统内的微物理特征存在密切联系(任星露等, 2020; 范思睿和王维佳, 2022),特别是出现在暖区一侧的对流系统微物理特征与冷暖气团共同产生的对流系统具有明显差别(Wu et al, 2020; 蒲义良等, 2023)。因此,研究西南涡诱发的局地强对流天气的微物理特征,对进一步认识四

48 川盆地夏季强对流天气的精细三维结构具有重要意义。

49 新一代高时间空间分辨率气象卫星和天气雷达观测资料是研究四川盆地夏季强对流天气微物理特征的
50 基本条件。杜倩等（2013）利用风云静止卫星云图资料和地面站点观测资料分析了一次西南涡造成的华南
51 暴雨过程，分析指出西南低涡暴雨云团出现在西南涡东南和南侧的南风盛行区域，并伴随低空急流加强。
52 范思睿等（2021）根据卫星资料反演得到四川盆地云降水微物理特征参数，分析得出盆地内能否产生强降
53 水主要取决于高低云配置和过冷水面积。

54 与卫星资料相比，天气雷达可以捕捉对流系统的三维结构，是推动中国当代强对流天气研究与业务发
55 展的重要支柱（孟智勇等，2019；俞小鼎和郑永光，2020）。通过分析、研究天气雷达资料，我国气象学
56 家对龙卷（杨祖祥等，2024）、雷暴（俞小鼎等，2020）和飚线（王易等，2022）等强对流天气的触发、发
57 展和维持机制有了新认识。双偏振雷达拥有水平和垂直方向上两个极化通道，能够提供除水平反射率因子
58 (Z_H)外的差分反射率因子(Z_{DR})、差分传播相移率(K_{DP})、相关系数(CC)等偏振观测量。这些偏振量能够较好
59 地反映大气中水凝物粒子的粒径相态、大小、下落方向等微物理信息（Bringi and Chandrasekar, 2001；李芳
60 和刁秀广，2023）。因此，双偏振雷达在定量降水估计、零度层识别以及相态类型识别等应用方面具有较大
61 的优势（刘黎平等，2016；Zhao et al, 2019；夏凡等，2023a；2023b）。

62 目前，基于雷达偏振量的水凝物粒子相态类型识别(HID)算法是研究大气云微物理结构的重要手段之一。
63 张延龙等（2012）利用 X 波段双偏振雷达观测和 HID 算法在针对一次雷暴过程的研究中指出，霰粒子和干
64 雪粒子的演变特征同雷暴的发展过程对应一致。周峰等（2023）利用 X 波段双偏振雷达观测和 HID 算法对
65 贵州威宁的一次雹暴过程进行了分析，并结合数值模拟明确了单体中过冷云水和高、低密度霰等冰相粒子
66 在雹胚形成和冰雹增长过程中的作用。陈刚等（2022）和 Zhao et al（2023）在对河南“2.17”特大暴雨过
67 程的分析中同样运用 HID 算法判别双偏振雷达观测资料，他们均指出冰相过程和暖雨过程在不同强度的对
68 流系统中起着重要作用。

69 随着重庆双偏振天气雷达观测网的建设与完善，为研究四川盆地东部局地强对流天气的雷达反射率因
70 子三维结构和水凝物相态类型等微物理特征提供了必要条件。本研究利用重庆陈家坪 S 波段双偏振雷达观
71 测、再分析资料和融合降水数据，分析了一次西南涡背景下四川盆地东部局地强对流天气的微物理结构。

72 1 资料与方法

73 1.1 资料

74 使用 2021 年 8 月 8 日 05~11 时（世界时，下同）重庆市陈家坪 S 波段双偏振雷达基数据分析此次天

75 气过程的微物理特征。该雷达波束宽度在 $0.989^\circ \sim 0.991^\circ$ ，完成一次体扫需 6min，每次体扫共 9 个仰角。
 76 雷达的径向分辨率为 250m，最大探测不模糊距离约为 230km，所使用的雷达观测偏振量包括：水平反射率
 77 因子(Z_H)、差分反射率因子(Z_{DR})、差分传播相移率(K_{DP})和相关系数(CC)。将分析时刻 $\pm 2\text{min}$ 内的雷达资料
 78 作为该时刻的观测。

79 天气形势和环境场分析使用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 第五代再分析大气数据 (ERA5)，时
 80 间分辨率为 1h，空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (Hersbach and Dee, 2016)；降水资料为国家气象信息中心提供的
 81 逐小时降水融合产品，空间分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ ；(潘昞等, 2018)；卫星观测采用国家卫星气象中心提供
 82 的逐小时 FY-2F 黑体亮温(TBB)资料。

83 1.2 方法

84 在个例进行分析前，对雷达基数据观测进行简单质量控制处理：首先剔除 $CC < 0.85$ 的非气象回波点
 85 (Giangrande and Ryzhkov, 2008)，然后剔除弱信噪比 ($< 10\text{ dB}$) 回波。为方便分析对流系统中各类水凝物
 86 的三维结构，在水平和垂直方向采用距离作为权重系数的线性插值法将雷达观测数据从极坐标系插值到水
 87 平分分辨率 1 km，垂直分辨率 0.25 km($< 3\text{ km}$)、0.5 km($< 9\text{ km}$)、1 km($< 20\text{ km}$)的笛卡尔坐标系中。此外，本研
 88 究将前后一小时累计降水量的平均表示该时刻的地面小时雨强。

89 基于双偏振雷达在云微物理观测方面的优势，模糊逻辑算法能够利用偏振量实现天气系统降水粒子类
 90 型识别(Zrnić et al, 2001; 曹俊武和刘黎平, 2007)。本研究采用 Dolan et al (2013) 基于模糊逻辑算法开发
 91 的双偏振雷达水凝物类型识别方案。该方案利用雷达观测 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 CC 和温度 T ，经模糊化计算得到
 92 雷达观测 i 与水凝物类型 j 的隶属度 β_{ij} (Dolan et al, 2009)，随后通过对水凝物类型 j 的所有隶属度加权平均
 93 (Dolan et al, 2013)得到模糊基 μ_j 实现规则判断，在集成模糊基后通过退模糊来实现水凝物类型的识别。识别
 94 结果包括：毛毛雨、雨、冰晶、干雪、湿雪、垂直积冰、低密度霰、高密度霰、冰雹以及大雨滴共十种水
 95 凝物粒子类型 (图 1)。

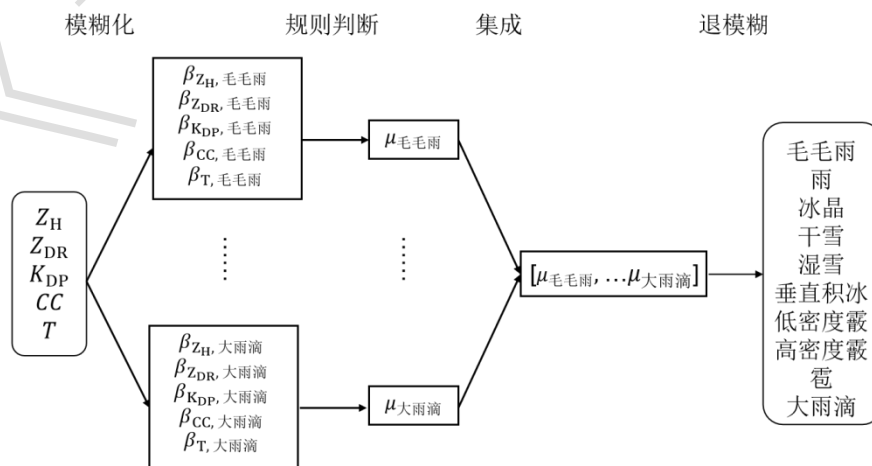


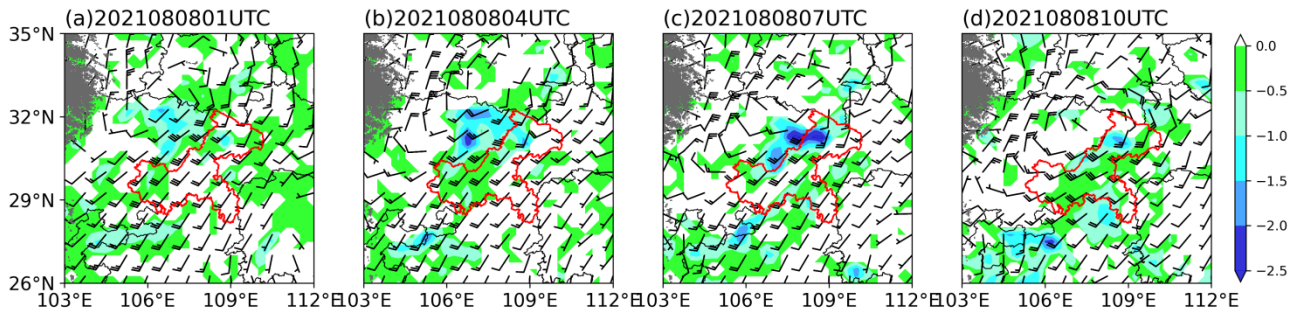
图 1 模糊逻辑算法水凝物类型识别流程

Fig. 1 The flow chart of HID by fuzzy logical algorithm

2 强对流过程回顾

2021 年 8 月 7 日 00 时至 9 日 12 时，四川盆地中东部出现的 β 中尺度对流系统，是导致此次区域性暴雨天气的直接原因（邓承之等，2023）。本研究重点分析 8 月 8 日重庆中部强降水过程的雷达观测及反演水凝物类型的三维分布特征。

由图 2 可见，700 hPa 风场显示，8 日 01~07 时西南涡自盆地东北部向东移动，其南侧 850 hPa 上形成水汽通量散度辐合中心并逐渐加强。07 时以后，水汽通量散度辐合中心随西南涡南移并减弱。低层暖湿平流的输送和水汽通量散度辐合为四川盆地东部强对流暴雨天气的发生提供了有利条件（Huang et al, 2019）。

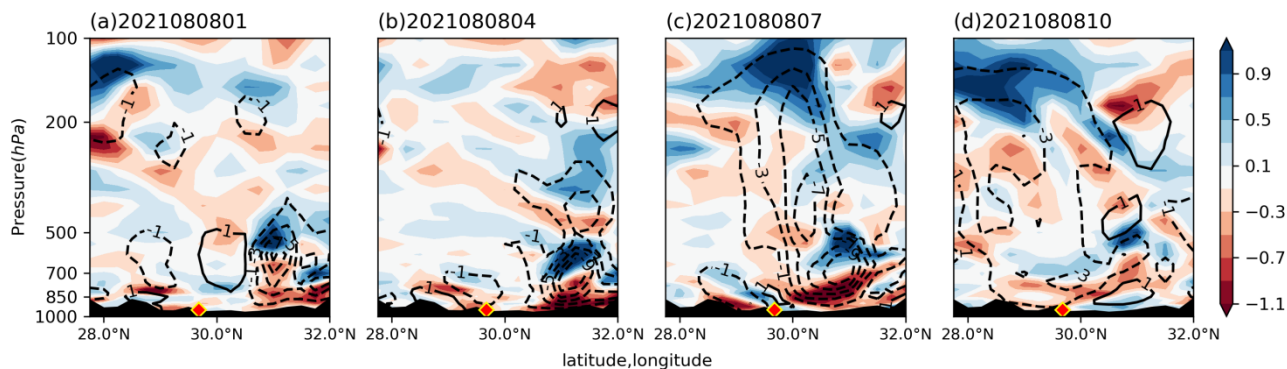


注：灰色为海拔 3 km 及以上地形。

图 2. 2021 年 8 月 8 日 700 hPa 风场(风羽)、850 hPa 水汽通量散度(填色, 单位: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 2 700 hPa wind (barb) and 850 hPa moisture flux convergence (colored, unit: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) on 8 August 2021

图 3 为垂直速度和散度沿 107°E 的垂直剖面。8 日 01~10 时，受西南涡东移影响，暴雨中心酒井村站（红色菱形）北侧的上升气流逐渐增强、变宽，在低层（700 hPa 以下）伴有较强的辐合中心。07 时，高层（200 hPa 以上）的辐散中心与低层的辐合中心配合，导致酒井村站附近的垂直速度增强，对流发展深厚。由图 2 和图 3 可知，西南涡东移带来的水汽输送和动力抬升对酒井村站上空的对流发展起到了重要作用。



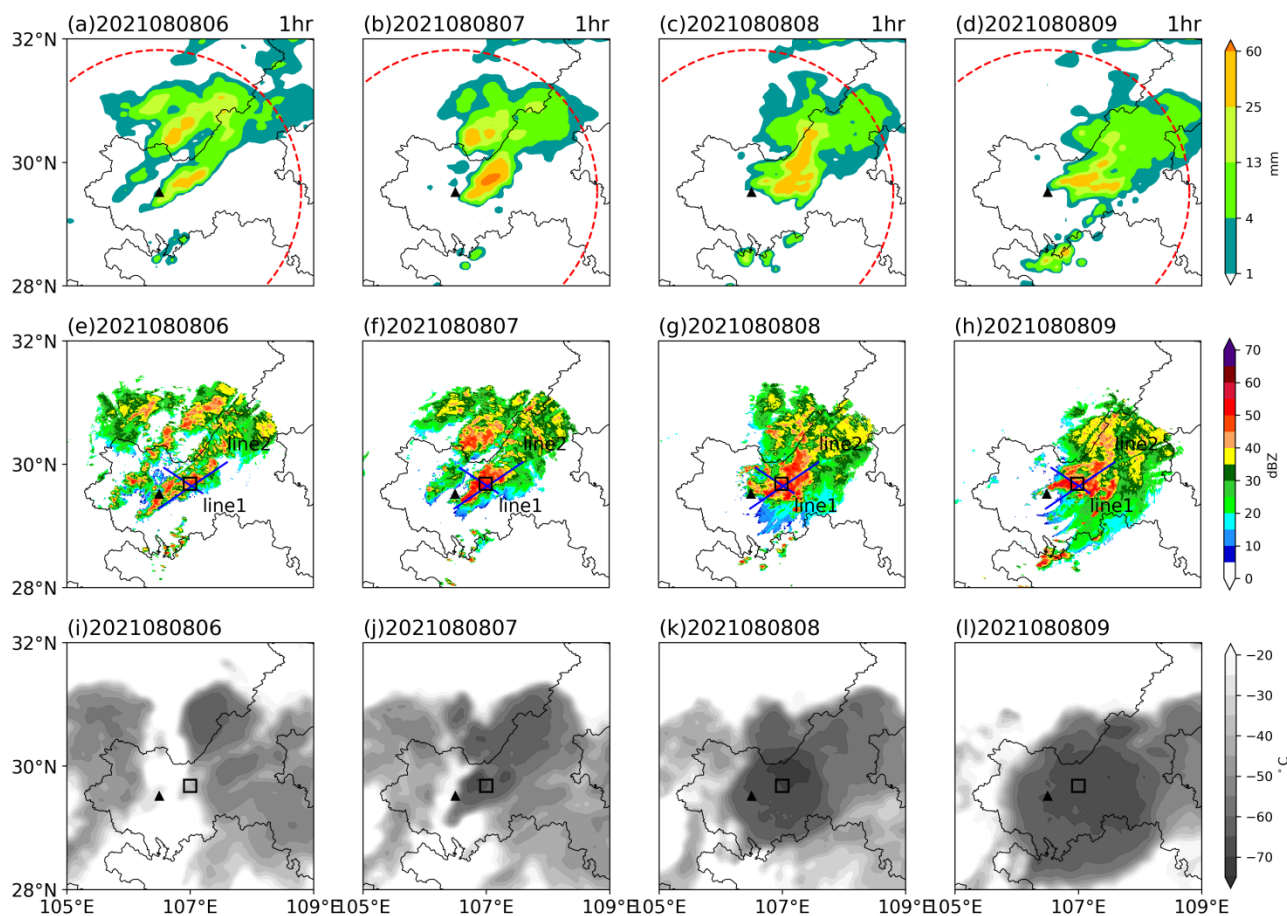
注：红色菱形代表酒井村站。

图 3. 2021 年 8 月 8 日垂直速度(等值线, 单位: $10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)和散度 (填色, 单位: 10^{-4}s^{-1})沿 107°E 的垂直剖面

Fig. 3 The vertical profile of vertical velocity(contour, unit: $10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence(colored, unit: 10^{-4}s^{-1}) along 107°E on 8

August 2021

图 4 给出了 8 日 06~09 时重庆中部地区小时累计降水量、雷达组合反射率因子和 TBB 分布。06 时，大量分散强回波出现在西南涡南侧，降水落区呈东北—西南走向（图 4a）。酒井村站（黑色方框）位于两个较强对流系统之间(图 4i)，TBB 梯度较大，对流系统呈发展趋势。07~08 时，雷达回波强度和面积迅速增加(图 4f, 4g)，位于强降水中心的酒井村站小时累计降水量达 85.9 mm，为本次过程最大小时降水量。TBB 显示酒井村站上空对流发展旺盛($\text{TBB} < -70^\circ \text{C}$)，冷云罩($\text{TBB} \leq -52^\circ \text{C}$)覆盖面积扩大，并有新的对流系统生成（图 4j, 4k）。09 时之后，对流系统向东南移动并逐渐减弱。综合以上分析，此次区域性暴雨是由切变线以南暖湿区内中尺度对流系统的发展与增强导致。



注：红色虚线代表雷达最大探测不模糊距离，黑色方框代表酒井村站，黑色三角代表雷达站，蓝色实线代表图 7～图 10 剖面位置。

图 4. 2021 年 8 月 8 日 (a~d) 小时累计降水量、(e~h) 雷达组合反射率因子、(i~l) TBB

Fig. 4 (a-d) Hourly accumulate precipitation, (e-h) radar composite reflectivity factor , (i-l) TBB on 8 August 2021

3 微物理变化特征分析

3.1 雷达反射率因子及偏振量变化特征

为了考察降水系统发展过程中，强降水中心低层液相区域内雷达反射率因子和偏振量的变化特征，图 5 给出了 8 日 05~11 时，以酒井村站为中心的 $20\text{ km} \times 20\text{ km}$ 区域(图 4e~4l 黑色方框)上空 2.5 km 高度处 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 不同值域区间占比、地面小时雨强和 CAPE 值的区域平均值随时间的变化。

对流系统发展初期 (05~06 时)，雷达反射率因子 (图 5a) 显示， 35 dBz 以上 Z_H 占比由 10% 左右迅速增至 60%，但是 45 dBz 以上 Z_H 占比增幅极小。同时段内， 1 dB 以上与 1 dB 以下的 Z_{DR} 占比相当，无明显变

138 化（图 5b）， K_{DP} 增长明显（图 5c）。由此可知，对流发展初期 35 dBz 以上 Z_H 和雨滴浓度快速增加，对应
139 地面小时雨强达到 $21\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右，CAPE 值增幅为 $0.1\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，大气不稳定性增加。

140 对流系统在 06~07 时快速发展，表现为 45 dBz 以上 Z_H 占比快速上升至 70%左右(图 5a)， Z_{DR} 和 K_{DP} 分
141 别超过 2 dB 和 $3\text{ }^{\circ}\text{km}^{-1}$ (图 5b, 5c)，CAPE 值接近 $1.2\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。因此，低层液相区域内降水粒子暖雨过程中
142 的碰并增长活跃（Kumjian and Prat, 2014），粒径和浓度快速增大，对应地面小时雨强接近 $60\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

143 07~11 时， Z_H ， Z_{DR} 和 K_{DP} 经历了减弱、增大、再减弱的发展趋势，CAPE 值下降说明对流潜势减弱。
144 07~09 时，45 dBz 以上 Z_H 占比由 75%降至 16%，超过 2 dB 和 $3\text{ }^{\circ}\text{km}^{-1}$ 的 Z_{DR} 和 K_{DP} 比例也明显减小，说明
145 该区域高度内雨滴粒径和浓度均有减小。09 时之后， Z_H ， Z_{DR} 和 K_{DP} 的大值占比有回升，但不及 07 时的峰
146 值。随后，各观测量相继减弱，降水过程逐渐结束。

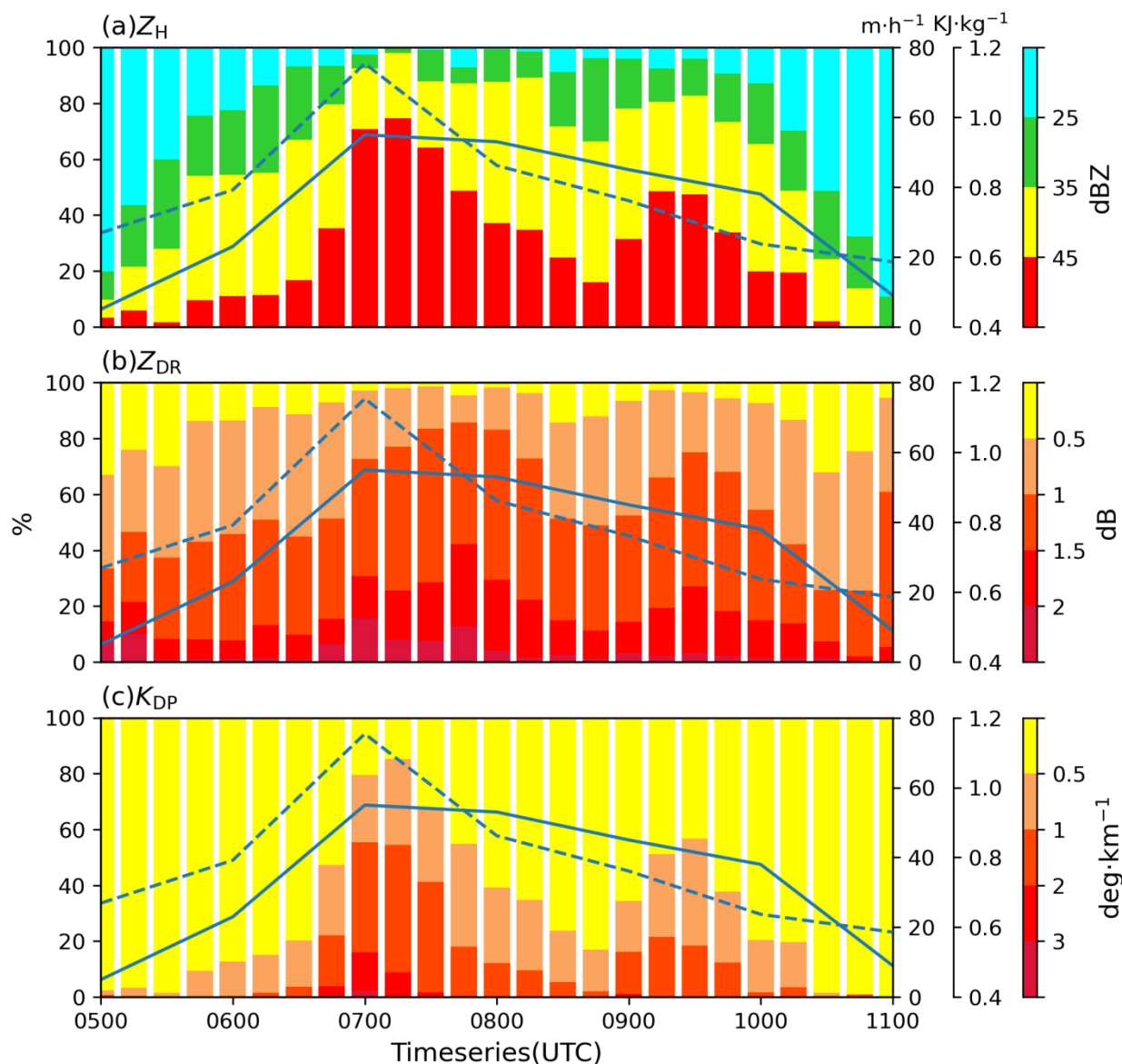
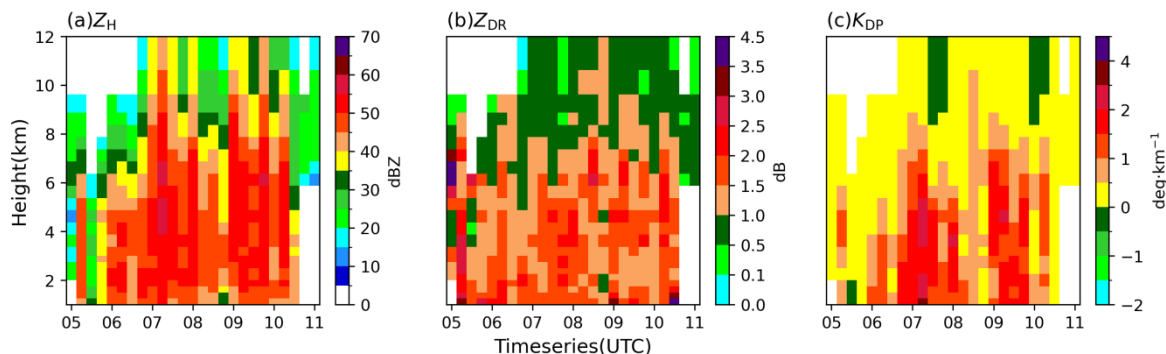


图 5 2021 年 8 月 8 日 05~11 时以酒井村站为中心的 $20\text{ km} \times 20\text{ km}$ 范围 2.5 km 高度处 (a) Z_H 、(b) Z_{DR} 、(c) K_{DP} 各值域区间占比 (填色) 及地面小时雨强 (单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) 和 CAPE 值 (单位: $\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的区域平均随时间的演变

Fig. 5 Time series of (a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) K_{DP} proportions (colored) in different intervals within in the region of $20\text{ km} \times 20\text{ km}$ centered at Jiujing Station) at 2.5 km and regional average of surface hourly rainfall intensity (unit: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) and CAPE (unit: $\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) from 5:00 UTC to 11:00 UTC 8 August 2021

为进一步揭示强降水中心上空 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 垂直结构变化, 图 6 给出酒井村站上空雷达观测随时间的演变。05~06 时, 低层 Z_H 由弱渐强, 但 20 dBZ 以上 Z_H 的高度并未超过 10 km (图 6a)。在中低层, Z_{DR} 普遍高于 1 dB (图 6b), K_{DP} 有增大趋势 (图 6c), 降水粒子增加。06~07 时, Z_H 迅速加强, 中低层 Z_H 维持在 45 dBZ 以上, Z_H 的高度首次超过 12 km , 对流发展强盛。同时, 中低层 Z_{DR} 和 K_{DP} 逐渐增大, 分别超过 1.5 dB 和 $1\text{ }^\circ\text{km}^{-1}$ 。

157 K_{DP} 大值区可达到 8 km 附近，配合中层较小的 Z_{DR} 值（6~8 km 附近约为 1.0 dB），说明该处可能出现过冷
 158 水和湿冰粒。07~09 时，45 dBz 以上 Z_H 和 3 $^{\circ}\text{km}^{-1}$ 以上 K_{DP} 分布高度均有下降，强度也明显减弱。09 时以
 159 后， Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 都经历了先增大后减小的变化过程。与 Z_{DR} （图 6b）相比， Z_H （图 6a）和 K_{DP} （图 6c）
 160 的垂直结构在整个强降水过程中（05~ 11 时）的变化特征更相似。



161 图 6 2021 年 8 月 8 日 05~11 时酒井村站上空(a) Z_H 、(b) Z_{DR} 、(c) K_{DP} 时间-高度演变

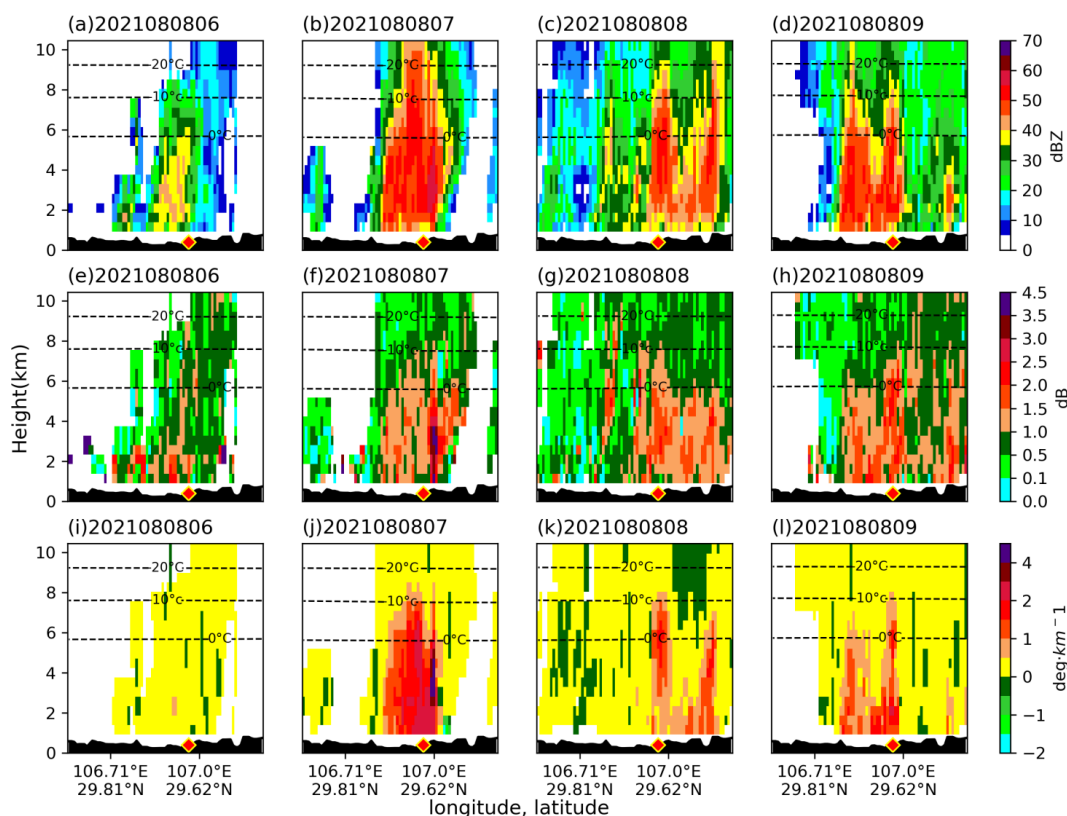
162 Fig. 6 Time-height evolution of (a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) K_{DP} over Jiujiang Station from 5:00 UTC to 11:00 UTC 8 August 2021

163 综上所述，在对流发展初期，强降水中心的上升运动逐渐增强，低层 Z_H 和 K_{DP} 大值及其占比明显增加，
 164 地面小时雨强随之增大。在对流系统迅速发展阶段， Z_H 和 K_{DP} 在垂直方向可延伸至 8 km，低层 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 大
 165 值及其占比快速增加，由液态水占主导，雨滴粒径和浓度均增加。此时，地面小时雨强可接近 60 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。
 166 因此，偏振量占比变化对地面小时雨强变化有很好的指示作用（赖晨等，2020）。随着对流系统减弱， Z_H ，
 167 Z_{DR} 和 K_{DP} 量级和伸展高度均有所减小。

168 3.2 强降水系统微物理特征的垂直结构

169 在副高西北侧西南风和中高纬低槽引导下，西南涡自西向东移动，其南侧暖湿区域的辐合线诱发了本
 170 次强降水过程。本研究分别从垂直于西南气流方向（图 4 line1）和平行于西南气流方向（图 4 line2）分析
 171 了 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和水凝物相态类型的垂直分布特征随时间的变化。line1 和 line2 相交于最大降水中心附近。
 172

173 图 7 和图 8 分别给出了过 line1 剖线的 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和水凝物类型识别结果的垂直剖面。在对流系统快
 174 速发展阶段， Z_H 最大值从 45 dBz 迅速增大至约 60 dBz，大于 45 dBz 的回波顶高度突破-20 $^{\circ}\text{C}$ 层（10 km 附
 175 近）（图 7a, 7b），说明对流发展深厚。 $Z_{DR}>1$ dB 和 $K_{DP}>1$ $^{\circ}\text{km}^{-1}$ 区域延伸至-10 $^{\circ}\text{C}$ 层以上，即 8 km 左右，
 176 形成了明显的 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱（图 7f, 7j），没有与强降水中心重合（图 7 红色菱形处）。雷达偏振量垂直分
 177 布说明了强烈的上升运动将液相降水粒子带入融化层之上形成过冷水(Kumjian and Ryzhkov, 2008)。低层偏
 178 振量大值区域与反射率因子大值区域相对应，说明该处有高浓度和大粒径的液相粒子存在。



注：黑色虚线分别代表 0℃、-10℃、-20℃层高度，红色菱形代表酒井村站，黑色阴影代表地形。

图 7. 2021 年 8 月 8 日过 line1 剖线的(a~d) Z_H 、(e~h) Z_{DR} 、(i~l) K_{DP} 垂直剖面

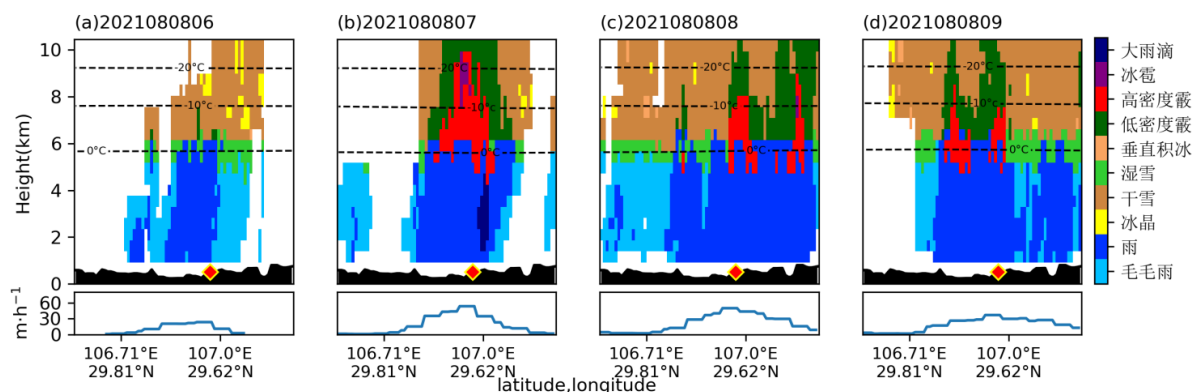
Fig. 7 Vertical profile of (a~d) Z_H , (e~h) Z_{DR} , (i~l) K_{DP} along line1 on 8 August 2021

水凝物相态识别结果（图 8b）可以更准确地反映上述过程。07 时，0℃层以上过冷水的输送通过淞附作用形成了大量低密度霰和高密度霰，这一过程中的微物理特征与陈刚等（2022）对河南“2.17”特大暴雨中深对流系统的研究结果相似。在对流上升运动末端识别出冰雹（8~10 km 高度处，-20℃层附近），地面未出现冰雹记录，与厦门一次超级单体中冰雹识别位置相似（林文等，2020）。高空霰区中雹的产生可能是在对流顶强扰流作用下基于霰粒子淞附或碰并而成，符合霰粒子对雹胚生长的贡献（周峰等，2023）。在强上升运动前侧 1~6 km 高度附近识别出大雨滴，符合“粒子分选”机制的特点(Dawson et al, 2014)。大雨滴与 0℃层以下的高密度霰“接壤”，较大 Z_{DR} (>3 dB) 反映了高密度霰向大雨滴活跃的融化过程（杨忠林等, 2019）。大雨滴对应地面位置即地面小时雨强最大处（酒井村站）。

08 时（图 7c, 7g, 7k），最大 Z_H 降低至 50 dBz，回波顶高下降至-10℃层（约 8 km）。 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱强度减弱，范围缩窄。相较于前一时刻，近地面雷达反射率因子和偏振量都明显减小，对流强度减弱，降水粒子粒径和浓度减小。高层低密度霰和高密度霰分布范围缩小，对应地面小时雨强变化不明显（图 8c）。

09 时（图 7d, 7h, 7l）对流单体的强回波部分继续影响酒井村区域， Z_H >50 dBz 的反射率因子区域向下延伸至

2 km 附近。0℃层附近 Z_{DR} 值偏大，主要以融化过程为主。 K_{DP} 柱结构相对减弱，大值区下沉，低层降水粒子浓度增加。虽然在对流单体自西向东移动过程中 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 变化迅速，但是酒井村站上空始终存在大量雨滴粒子（图 8d），有利于强降水的发生。因此，通过水凝物类型识别结果可以更好地描述对流系统变化与地面小时雨强的关系。

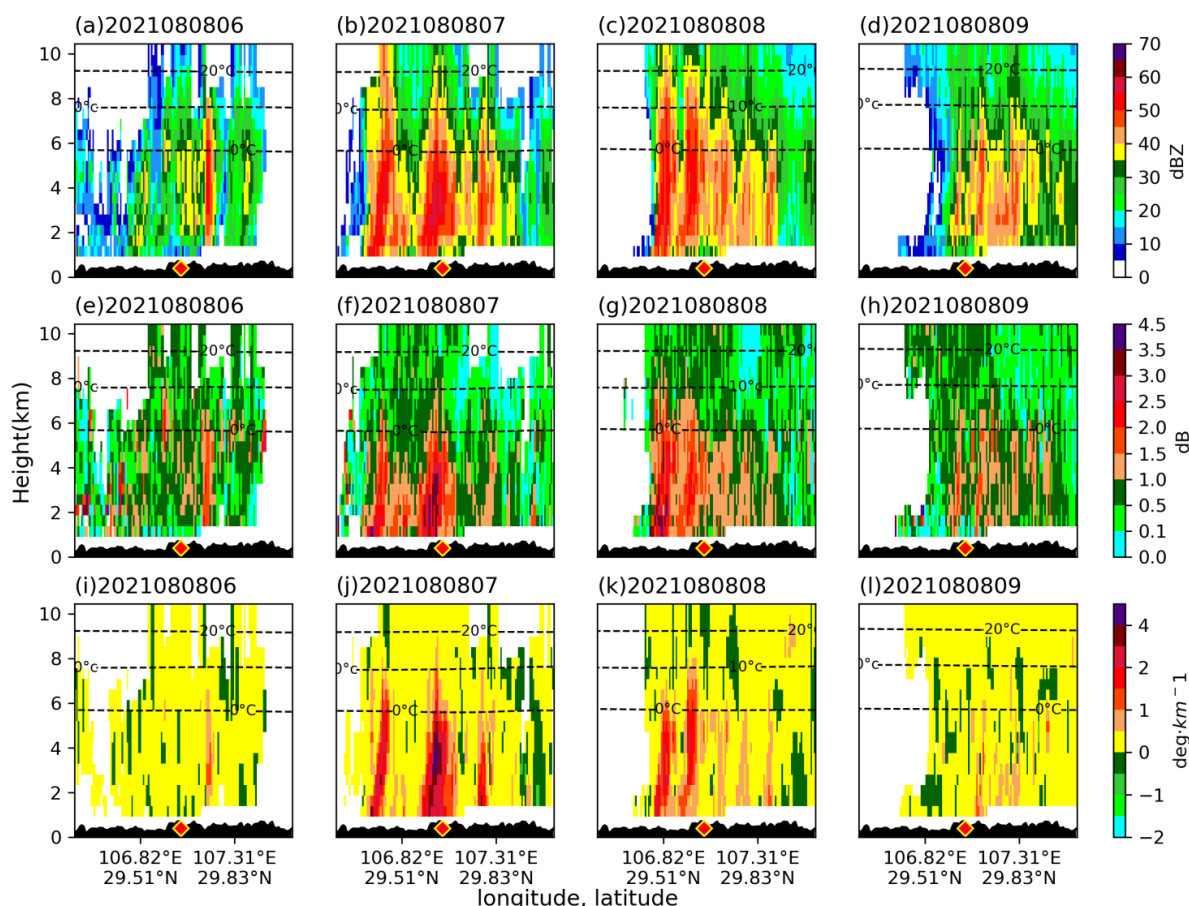


注：黑色虚线分别代表 0℃、-10℃、-20℃层高度，红色菱形代表酒井村站，黑色阴影代表地形。

图 8 2021 年 8 月 8 日过 line1 剖线的水凝物相态类型识别结果（填色）的垂直剖面 and 地面小时雨强(折线)空间演变

Fig. 8 Vertical profile of HID results (colored) and spatial evolution of surface hourly rainfall intensity (fold line) along line1 on 8 August 2021

图 9 和图 10 分别给出了过 line2 剖线的 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和水凝物类型识别结果的垂直剖面。对流发展初期，辐合线上雷达反射率因子和偏振量都较弱（图 9a, 9e, 9i）。0℃层以上多为雪粒子，0℃层以下以小粒径的毛毛雨为主，地面小时雨强整体偏弱(图 10a)。随着对流系统东移至酒井村站上空，07 时辐合线上迅速出现三个发展旺盛的对流单体（图 9b）。每个单体内 >45 dBz 的反射率因子高度均达到-10℃~-20℃，且都出现 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱（图 9f, 9j）。在低层， $Z_{DR}>3$ dB， $K_{DP}>4$ °km⁻¹。08 时，酒井村站西南处对流系统移动路径上游的单体强烈发展，低层 Z_{DR} 超过 4 dB， K_{DP} 维持在 2 °km⁻¹以内（图 9c, 9g, 9k）。09 时以后对流单体逐渐减弱（图 9d, 9h, 9l）。

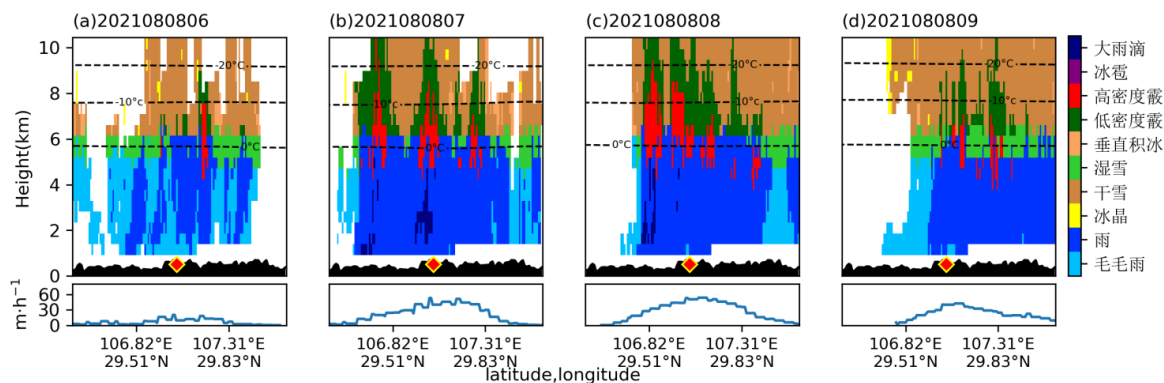


注：黑色虚线代表分别代表 0°C、-10°C、-20°C 层高度，红色菱形代表酒井村站，黑色阴影代表地形。

图 9 2021 年 8 月 8 日过 line2 剖面(a~d) Z_H 、(e~h) Z_{DR} 、(i~l) K_{DP} 的垂直剖面

Fig. 9 Vertical profile of (a—d) Z_H , (e—h) Z_{DR} , (i—l) K_{DP} along line2 on 8 August 2021

水凝物相态识别结果显示，07 时对流单体的中高层均出现大范围低密度霰和高密度霰，中低层毛毛雨减少，雨滴增加，并出现两处大雨滴集群（图 10b）。与对流发展初期（06 时）相比，07 时地面小时雨强明显增强。08 时，大雨滴落区位于酒井村站西南侧对流系统移动路径上游（图 10c），使得该处地面小时雨强较上一时刻增强。但由于局地降水的持续性，酒井村站仍为地面小时雨强最大处。09 时以后，对流系统继续东移并减弱，中高层低密度霰和高密度霰减少，干雪和湿雪增加，中低层逐渐出现毛毛雨，地面小时雨强逐渐减弱（图 10d）。整体来看，低层液相粒子（毛毛雨，雨，大雨滴）的出现与地面小时雨强变化具有一定联系，而雨带上最大地面小时雨强位置也与该处的对流系统强度和维持时间密切相关。

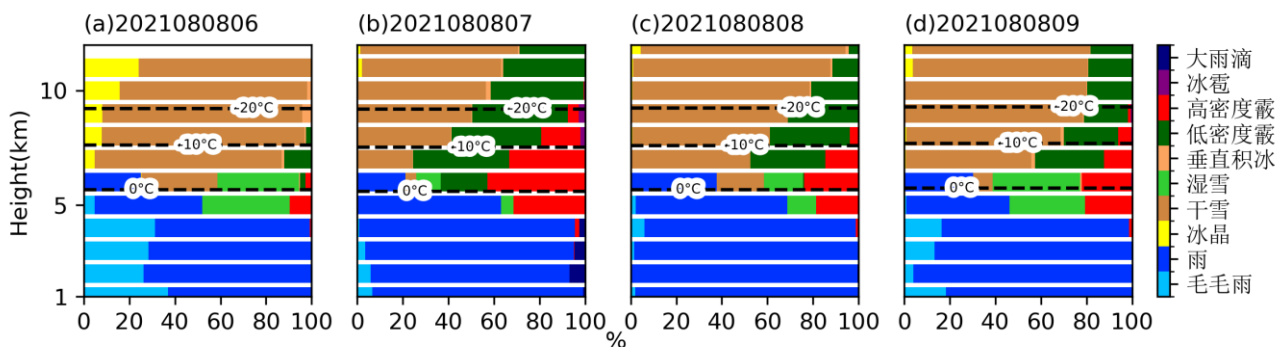


注：黑色虚线代表分别代表 0℃、-10℃、-20℃层高度，红色菱形代表酒井村站，黑色阴影代表地形。

图 10 2021 年 8 月 8 日过 line2 剖面水凝物相态类型识别结果（填色）的垂直剖面 and 地面小时雨强(折线)的空间演变

Fig. 10 Vertical profile of HID results (colored) and spatial evolution of surface hourly rainfall intensity (fold line) along line2 on 8 August 2021

为进一步分析对流系统在各阶段水凝物占比的垂直分布，图 11 给出了以酒井村站为中心 20 km×20 km 范围内(图 4 黑框所示)水凝物归一化出现频率(Friedrich et al, 2016; 陈刚等, 2022)。在对流系统发展初期（图 11a），系统内部垂直运动不强，所有水凝物粒子分布高度未超过 12 km，其中冰相粒子以干雪和湿雪为主，低密度霰和高密度霰占比极小，低于 10 %。在 0℃层以下，毛毛雨占比约 30 %。雨滴主要由干雪和湿雪下落融化，或是毛毛雨碰撞合并而成（Kumjian and Prat, 2014）。07 时（图 11b），对流系统的迅速发展使冰相微物理过程增强，水凝物粒子分布高度延伸至 15 km。中高层低密度霰和高密度霰占比大幅提升至 80 % 左右。随着高空冰相粒子下落融化，中低层出现少量大雨滴，雨滴占比减少至 5 % 左右。08~09 时，对流系统强度减弱，导致中高层低密度霰和高密度霰占比下降，融化层以下毛毛雨占比回升至 20 % 左右。



注：黑色虚线代表分别代表 0℃、-10℃、-20℃层高度

图 11 2021 年 8 月 8 日以酒井村站为中心 20 km × 20 km 范围内水凝物相态类型占比的垂直分布

Fig. 11 Vertical distribution of proportions by different hydrometeor types over the region of 20 km × 20 km box centered on Jiujiang

4 结论

本研究利用 2021 年 8 月 8 日的重庆 S 波段双偏振雷达基数据、ERA5 再分析资料和 CMPAS 降雨融合产品, 结合模糊逻辑算法得到水凝物分类结果, 分析了一次西南涡背景下局地强对流天气过程的微物理结构, 主要结论如下:

(1) 对流系统发展初期, 中低层 Z_H 和 K_{DP} 开始增加, 降水粒子类型主要以毛毛雨和雨为主, 地面小时雨强偏弱。由于初期上升运动不强, 融化层附近冰相粒子以雪粒子为主, 霰粒子极少。

(2) 对流系统快速发展阶段, 在强降水中心酒井村站附近的对流单体最为强盛, 该单体内最大 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 分别达到 55 dBz、3 dB、4 °km⁻¹ 以上, Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱垂直高度延伸达到 8 km。强烈的上升运动将低层液相粒子抬升至融化层以上形成过冷水, 并在淞附作用下形成大量霰粒子。虽然高层出现雹, 但雹粒子分布范围小、持续时间短, 说明本次过程的冰相微物理过程较弱, 地面没有出现降雹过程。中低层出现高浓度、大粒径雨滴, 地面小时雨强达到最大。

(3) 多个对流单体逐渐合并、减弱东移阶段, Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 经历了减弱、增强、再减弱的过程。由于对流系统强度减弱, 中高层霰粒子数量减少, 冰相粒子再次以干雪和湿雪为主, 中低层雨滴粒径和数量均减小, 地面小时雨强也随之变弱。

(4) 结合宏微观条件来看, 西南涡背景下低层西南暖湿气流提供了充分的水汽热力条件。在切变线以南的暖湿区内, 强上升运动和高层冰相云促进了融化层以上冰相微物理过程的发展, 进而生成大量的霰粒子。在低层暖湿环境下, 高密度霰粒子下落融化形成高浓度和大粒径的雨滴, 并导致地面小时雨强迅速增强。

综上所述, 本研究总结了西南涡背景下四川盆地东部一次局地强对流天气过程中对流系统的微物理结构特征, 研究结论是否适用于四川盆地不同区域还有待更多个例的印证。此外, 本文中雷达资料的质量控制较简单, 发展更高效、更良好的质量控制算法是提高雷达资料应用水平的基础。同时, 结合雨滴谱仪观测和高分辨率数值模式数据研究西南地区局地强对流微物理结构与复杂地形条件下中小尺度天气系统发生发展机制的关系是未来研究的热点。

参考文献:

曹俊武, 刘黎平, 2007. 双线偏振雷达判别降水粒子类型技术及其检验[J]. 高原气象, 26(1): 116-127. Cao J W, Liu L P, 2007. The sensitivity study for classification of precipitation particle types based on dual-linear polarimetric radar[J]. Plateau Meteor, 26(1): 116-127 (in Chinese).

陈刚, 赵坤, 吕迎辉, 等, 2022. 河南“21.7”特大暴雨过程微物理特征变化分析[J]. 中国科学: 地球科学, 52(10): 1887-1904. Chen G, Zhao K, Lv Y H, et al, 2022. Variability of microphysical characteristics in the “21.7” Henan extremely heavy rainfall event[J]. Sci China Earth Sci, 65(10): 1861-1878.

程晓龙, 李跃清, 衡志伟, 2021. 川贵渝复杂地形下横槽诱发双涡贵州暴雨过程的数值模拟[J]. 气象学报, 79(4): 626-645. Cheng X L, Li Y Q, Heng Z W, 2021. Numerical simulation of a torrential rain process in Guizhou triggered by two vortices originating from a transverse trough over the Sichuan-Guizhou-Chongqing complex terrain[J]. Acta Meteor Sin, 79(4): 626-645 (in Chinese).

邓承之, 张焱, 李强, 等, 2023. 四川盆地一次暖性西南低涡大雨的中尺度分析[J]. 暴雨灾害, 42(1): 24-36. Deng C Z, Zhang Y, Li Q, et al, 2023. Mesoscale analysis on one warm Southwest Vortex rainstorm in the Sichuan basin[J]. Torr Rain Dis, 42(1): 24-36 (in Chinese).

杜倩, 覃丹宇, 张鹏, 2013. 一次西南低涡造成华南暴雨过程的 FY-2 卫星观测分析[J]. 气象, 39(7): 821-831. Du Q, Qin D Y, Zhang P, 2013. Observation and analysis of a southwest vortex rainstorm in Southern China using FY-2 satellite data[J]. Meteor Mon, 39(7): 821-831 (in Chinese).

范思睿, 王维佳, 刘贵华, 等, 2021. 基于 NPP 卫星反演四川盆地夏季降水微物理特征[J]. 成都信息工程大学学报, 36(4): 467-471. Fan S R, Wang W J, Liu G H, et al, 2021. Retrieval of microphysical properties of summer cloud precipitation in Sichuan basin based on NPP satellitedata[J]. J Chengdu Univ Inf Technol, 36(4): 467-471 (in Chinese).

范思睿, 王维佳, 2022. 四川盆地秋季一次层状云弱降水过程的微物理特征观测分析[J]. 暴雨灾害, 41(4): 445-457. Fan S R, Wang W J, 2022. Analysis on the microphysical characteristics of weak precipitation process observation of a stratiform cloud in Sichuan Basin in autumn[J]. Torr Rain Dis, 41(4): 445-457 (in Chinese).

韩林君, 白爱娟, 2019. 2004—2017 年夏半年西南涡在四川盆地形成降水的特征分析[J]. 高原气象, 38(3): 552-562. Han L J, Bai A J, 2019. Precipitation characteristics of southwest vortex in Sichuan Basin from May to October in 2004—2017[J]. Plateau Meteor, 38(3): 552-562 (in Chinese).

何光碧, 2012. 西南低涡研究综述[J]. 气象, 38(2): 155-163. He G B, 2012. Review of the southwest vortex research[J]. Meteor Mon, 38(2): 155-163 (in Chinese).

蒋璐君, 李国平, 王兴涛, 2015. 基于 TRMM 资料的高原涡与西南涡引发强降水的对比研究[J]. 大气科学, 39(2): 249-259. Jiang L J, Li G P, Wang X T, 2015. Comparative study based on TRMM data of the heavy rainfall caused by the Tibetan Plateau vortex and the southwest vortex[J]. Chin J Atmos Sci, 39(2): 249-259 (in Chinese).

赖晨, 支树林, 李婕, 等, 2020. SC 型双偏振雷达在江南南部一次对流性天气过程中的应用分析[J]. 气象, 46(11): 1427-1439. Lai C, Zhi S L, Li J, et al, 2020. Application of SC dual-polarization radar to a convective weather case in south to Yangtze River[J]. Meteor Mon, 46(11): 1427-1439 (in Chinese).

李芳, 刁秀广, 2023. 不同类型强降水风暴低层双偏振参量对比分析[J]. 气象, 49(9): 1075-1084. Li F, Diao X G, 2023. Comparative analysis of low-level dual polarization parameters of different types of severe rainfall storm[J]. Meteor Mon, 49(9): 1075-1084 (in Chinese).

李国平, 2013. 高原涡、西南涡研究的新进展及有关科学问题[J]. 沙漠与绿洲气象, 7(3): 1-6. Li G P, 2013. Advances in Tibetan Plateau vortex and

298 Southwest vortex research and related scientific problems[J]. Desert Oasis Meteor, 7(3): 1-6 (in Chinese).

299 李跃清, 徐祥德, 2016. 西南涡研究和观测试验回顾及进展[J]. 气象科技进展, 6(3): 134-140. Li Y Q, Xu X D, 2016. A review of the research and observing
300 experiment on Southwest China Vortex[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3): 134-140 (in Chinese).

301 林文, 张深寿, 罗昌荣, 等, 2020. 不同强度强对流云系 S 波段双偏振雷达观测分析[J]. 气象, 46(1): 63-72. Lin W, Zhang S S, Luo C R, et al,
302 2020. Observational analysis of different intensity severe convective clouds by S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 46(1): 63-72 (in
303 Chinese).

304 刘黎平, 胡志群, 吴翀, 2016. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和應用[J]. 气象科技进展, 6(3): 28-33. Liu L P, Hu Z Q, Wu C, 2016.
305 Development and application of dual linear polarization radar and phased-array radar[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3): 28-33 (in Chinese).

306 孟智勇, 张福青, 罗德海, 等, 2019. 新中国成立 70 年来的中国大气科学研究: 天气篇[J]. 中国科学: 地球科学, 49(12): 1875-1918. Meng Z Y, Zhang F Q,
307 Luo D H, et al, 2019. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Synoptic meteorology[J]. Sci China Earth Sci, 62(12):
308 1946-1991.

309 蒲义良, 卢树诗, 胡胜, 等, 2023. 华南沿海一次暖区特大暴雨的对流特征和发展机制分析[J]. 气象, 49(2): 201-212. Pu Y L, Lu X S, Hu S, et al, 2023.
310 Convective characteristics and development mechanism of an extreme warm-sector rainfall in the coastal area of South China[J]. Meteor Mon, 49(2):
311 201-212 (in Chinese).

312 潘旸, 谷军霞, 徐宾, 等, 2018. 多源降水数据融合研究及应用进展[J]. 气象科技进展, 8(1): 143-152. Pan Y, Gu J X, Xu B, et al, 2018. Advances in
313 multi-source precipitation merging research[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(1): 143-152 (in Chinese).

314 任星露, 张述文, 汪兰, 等, 2020. 不同云微物理方案对弱天气尺度强迫下一次强对流的模拟[J]. 高原气象, 39(4): 750-761. Ren X L, Zhang S W, Wang L,
315 et al, 2020. Different cloud microphysics parameterization schemes on a strong convection simulation under weak synoptic-scale
316 forcing[J]. Plateau Meteor, 39(4): 750-761 (in Chinese).

317 师锐, 陈永仁, 肖红茹, 2014. 2013 年四川盆地持续性特大暴雨过程对比分析[J]. 高原山地气象研究, 34(4): 11-15, 76. Shi R, Chen Y R, Xiao H R, 2014.
318 Comparative analysis of continuous rainstorm in Sichuan basin in 2013[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 34(4): 11-15, 76 (in Chinese).

319 王易, 郑媛媛, 庄潇然, 等, 2022. 江苏典型下击暴流风暴结构特征统计分析[J]. 气象学报, 80(4): 592-603. Wang Y, Zheng Y Y, Zhuang X R, et al, 2022.
320 Statistical analysis of the structural characteristics of typical downbursts in Jiangsu province, China[J]. Acta Meteor Sin, 80(4): 592-603 (in Chinese).

321 夏凡, 吴炜, 张乐坚, 等, 2023a. 基于 S 波段双偏振雷达融化层识别算法的研究[J]. 气象, 49(2): 146-156. Xia F, Wu W, Zhang L J, et al, 2023a. Study of
322 designation algorithm of the melting layer based on S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 49(2): 146-156 (in Chinese).

323 夏凡, 龚佃利, 潘佳文, 等, 2023b. 双偏振雷达水凝物分类算法优化及在雹暴云的应用分析[J]. 气象, 49(11): 1343-1358. Xia F, Gong D L, Pan J W, et al,
324 2023b. The hydrometeor classification optimum algorithm for polarimetric radar and its application for the hailstorm cloud[J]. Meteor Mon, 49(11):
325 1343-1358 (in Chinese).

326 杨忠林, 赵坤, 徐坤, 等, 2019. 江淮梅雨期极端对流微物理特征的双偏振雷达观测研究[J]. 气象学报, 77(1): 58-72. Yang Z L, Zhao K, Xu K, et al, 2019.
327 Microphysical characteristics of extreme convective precipitation over the Yangtze-Huaihe river basin during the Meiyu season based on polarimetric radar

328 data[J]. Acta Meteor Sin, 77(1): 58-72 (in Chinese).

329 杨祖祥, 李萌萌, 王磊, 等, 2024. 2023 年 9 月 19 日阜宁致灾强龙卷多源观测分析[J]. 气象, 50(12): 1467-1479. Yang Z X, Li M M, Wang L, et al, 2024.

330 Analysis of multi-source observation of the disastrous tornado in Funing County on 19 September 2023[J]. Meteor Mon, 50(12): 1467-1479 (in Chinese).

331 俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等, 2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社: 416. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Thunderstorms and

332 Severe Convection Nowcasting[M]. Beijing: China Meteorological Press: 416 (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文献英文信息, 请确

333 认)

334 俞小鼎, 郑永光, 2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报, 78(3): 391-418. Yu X D, Zheng Y G, 2020. Advances in severe convective

335 weather research and operational service in China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3): 391-418 (in Chinese).

336 翟丹华, 刘德, 李强, 等, 2014. 引发重庆中西部暴雨的西南低涡特征分析[J]. 高原气象, 33(1): 140-147. Zhai D H, Liu D, Li Q, et al, 2014. Feature

337 analysis of southwest vortex causing heavy rain in western and middle Chongqing[J]. Plateau Meteor, 33(1): 140-147 (in Chinese).

338 张静, 孙美, 2021. 2020 年 8 月 10~14 日四川盆地一次持续性暴雨过程特征及成因分析[J]. 高原山地气象研究, 41(3): 50-57. Zhang J, Sun X, 2021.

339 Characteristics and cause analysis on a continuous severe rainstorm process in Sichuan basin from August 10 to 14, 2020[J]. Plateau Mountain Meteor Res,

340 41(3): 50-57 (in Chinese).

341 张廷龙, 杨静, 楚荣忠, 等, 2012. 平凉一次雷暴云内的降水粒子分布及其电学特征的探讨[J]. 高原气象, 31(4): 1091-1099. Zhang T L, Yang J, Chu R Z, et

342 al, 2012. Distribution of precipitation particle and electrical characteristic of a thunderstorm in Pingliang region[J]. Plateau Meteor, 31(4): 1091-1099 (in

343 Chinese).

344 周春花, 肖递祥, 郁淑华, 2022. 诱发四川盆地极端暴雨的西南涡环流背景和结构特征[J]. 气象, 48(12): 1577-1589. Zhou C H, Xiao D X, Yu S H, 2022.

345 Circulation background and structural characteristics of the southwest vortex inducing extreme rainstorm in Sichuan basin[J]. Meteor Mon, 48(12):

346 1577-1589 (in Chinese).

347 周峰, 周筠珺, 邹书平, 等, 2023. 贵州威宁雹暴微物理特征的观测及数值模拟研究[J]. 热带气象学报, 39(4): 551-566. Zhou F, Zhou Y J, Zou S P, et al,

348 2023. Study on observation and numerical simulation of microphysical characteristics of hailstorm in Weining County, Guizhou Province[J]. J Trop Meteor,

349 39(4): 551-566 (in Chinese).

350 周玉淑, 颜玲, 吴天贻, 等, 2019. 高原涡和西南涡影响的两次四川暴雨过程的对比分析[J]. 大气科学, 43(4): 813-830. Zhou Y S, Yan L, Wu T Y, et al,

351 2019. Comparative analysis of two rainstorm processes in Sichuan Province affected by the Tibetan Plateau vortex and Southwest vortex[J]. Chin J Atmos

352 Sci, 43(4): 813-830 (in Chinese).

353 Bringi V N, Chandrasekar V, 2001. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 636.

354 Dawson D T, Mansell E R, Jung Y, et al, 2014. Low-level Z_{DR} signatures in supercell forward flanks: The role of size sorting and melting of hail[J]. J Atmos Sci,

355 71(1): 276-299.

356 Dolan B, Rutledge S A, 2009. A Theory-based hydrometeor identification algorithm for X-Band polarimetric radars[J]. J Atmos Oceanic Technol, 26, 2071-2088.

357 Dolan B, Rutledge S A, Lim S, et al, 2013. A robust C-band hydrometeor identification algorithm and application to a long-term polarimetric radar dataset[J]. J
358 Appl Meteor Climatol, 52(9): 2162-2186.

359 Giangrande S E, Ryzhkov A V, 2008. Estimation of rainfall based on the results of polarimetric echo classification[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(9): 2445-2462.

360 Friedrich K, Kalina E A, Aikins J, et al, 2016. Precipitation and cloud structures of intense rain during the 2013 Great Colorado Flood[J]. J Hydrometeor, 17, 27–
361 52.

362 Hersbach H, Dee D, 2016. ERA5 reanalysis is in production[R/OL]. [2016-04]. <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production>.

363 Huang Y J, Wang Y P, Cui X P, 2019. Differences between convective and stratiform precipitation budgets in a torrential rainfall event[J]. Adv Atmos Sci, 36(5):
364 495-509.

365 Kumjian M R, Ryzhkov A V, 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(7): 1940-1961.

366 Kumjian M R, Prat O P, 2014. The impact of raindrop collisional processes on the polarimetric radar variables[J]. Atmos Sci, 71(8): 3052-3067.

367 Wu Y L, Gao Y D, Chen D H, et al, 2020. Synoptic characteristics related to warm-sector torrential rainfall events in South China during the annually first rainy
368 season[J]. J Trop Meteor, 26(3): 253-260.

369 Zhao K, Huang H, Wang M J, et al, 2019. Recent progress in dual-polarization radar research and applications in China[J]. Adv Atmos Sci, 36(9): 961-974.

370 Zhao K, Xu X, Xue M, et al, 2023. The dynamics and microphysical characteristics of the convection producing the record-breaking hourly precipitation on 20
371 July 2021 in Zhengzhou, China[J]. Remote Sens, 15(18): 4511.

372 Zrnić D, Ryzhkov A, Straka J, et al, 2001. Testing a procedure for automatic classification of hydrometeor types[J]. J Atmos Ocean Technol, 18(6): 892-913.