

杨俊梅,孙鸿娉,田晓婷,等.山西中部一次积层混合云降水微物理特征研究[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(3):24-31.
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2024.03.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



山西中部一次积层混合云降水 微物理特征研究

杨俊梅^{1,2,3},孙鸿娉¹,田晓婷⁴,王洪霞⁵

(1.山西省人工影响天气中心,山西 太原 030032;2.中国气象局云雾物理环境重点开发实验室,北京 100081;
3.人工影响天气山西省重点实验室,山西 太原 030032;4.太原市气象局,山西 太原 030082;
5.山西省气象台,山西 太原 030006)

摘要:基于2011年5月9日山西中部一次积层混合云降水的飞机探测和地面雨滴谱观测资料,分析了空中云系微物理参量的垂直分布、冰晶形态及演变和地面降水的微物理特征。结果表明:积层混合云为冷云结构,垂直分布不均匀,云中过冷水较为丰沛,对流泡的存在造成云内不同区域云水含量不均匀。云滴的凝华增长导致5.3 km处大云粒子和降水粒子数浓度明显增加。小云粒子谱分布以单峰型为主,峰值直径主要位于5~6 μm或9~10 μm,大云粒子谱分布呈多峰型,不同高度处变化较大。观测到的冰晶形态包括板状、针柱状、柱帽状、辐枝状和不规则形状,4.9 km处受聚合和淞附过程的共同影响,辐枝状和针柱状冰晶增多,在4.1 km处融化层附近淞附状冰晶明显增加。地面降水受到雨滴谱仪布设位置的影响,其微物理结构主要呈现层状云降水的特征。

关键词:积层混合云;微物理特征;垂直结构;粒子形态

中图分类号:P481;P426.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-0799(2024)03-0024-08

积层混合云是由大范围较深厚的层状云和嵌在其中的对流云组成的云系,云中宽广湿润的层云有利于积云生命期的延长,因此,积层混合云作为一种较为有效的降水系统,也是我国开展人工影响天气作业的主要对象。随着雷达、卫星、机载设备和雨滴谱仪等观测手段的不断发展,国内外针对积层混合云的研究也取得了很大进展。Matejka等^[1]研究发现积层混合云中的对流泡会造成积云区液态水高于层云区。Hobbs等^[2]对比了积层混合云不同区

域下方降水量,发现对流单体下方的降水量明显升高。由于飞机观测能直观获取云中不同位置的微物理结构信息,我国北方近年来开展了许多相关研究。汪学林等^[3]对吉林省积层混合云观测资料分析,发现对流云内云滴数浓度是云外的2~20倍,谱型以多峰型为主。孙玉稳等^[4]对太行山东麓积层混合云开展了5次垂直探测,发现5 000 m以上冷云上层中过冷水含量较大,是冰晶重要增长区,适合开展催化作业。张景红等^[5]利用机载探测资料分析人工增雨催化响应区云系变化,得出响应区冰粒子数浓度增加,过冷水含量减少,雷达回波强度增加,催化响应效果明显。张佃国等^[6]对山东地区不同回波强度的对流泡样本进行分析,发现对流泡内过冷水含量较高,冰晶数浓度较大。刘春文等^[7]开展了76次积层混合云飞机观测,结果表明云南云粒子数浓度远高于华北地区。亓鹏等^[8]对河北地区对流

收稿日期:2022-08-25;修回日期:2023-10-28

基金项目:山西省重点研发计划项目(202202130501020);中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题(2020Z00713);国家重点研发计划(2019YFC1510301);山西省气象局重点课题(SXKZDDW20195606)

作者简介:杨俊梅(1986—),女,高级工程师,主要从事云降水物理与人工影响天气研究。E-mail:yangjunmei106@126.com

泡中粒子浓度和液态含水量进行分析,提出在具有较高过冷水含量的对流泡中降水形成符合“播撒—供给”机制。Mcfarquhar 等^[9]通过分析机载二维云粒子探头 2DC 观测数据发现,对流区域的冰晶形态、浓度和粒子谱与层云区域差别很大。Carey 等^[10]分析得出在-12~-26 °C 的云中,云顶位置有板状冰晶出现,而辐枝状和聚合状冰晶通常在云中较低的位置出现。朱士超等^[11]分析了两次积层混合云中冰晶形状、分布与增长过程,发现云中低层冰晶形态分布受云顶温度的变化影响较大。数值模式也是分析积层混合云微物理结构的常见方法^[12-15]。高茜等^[16]将数值模拟与飞机观测相结合,对比了云中不同部位冰粒子形状和生成过程。雨滴谱观测资料能够反应地面降水雨强、数浓度、谱分布等特征^[17-19],王瑾等^[20]将西安地区 43 次积层混合云降水进行统计分析,得到了适用于当地的 Z-R 关系。

本文以山西地区 2011 年 5 月 9 日一次积层混合云降水为研究对象,对机载探测设备获取的包括云滴谱和云中粒子形态等云微物理特征进行分析,探讨了同时段地面降水的微物理特征,较全面的获取了此次降水云的垂直结构,对指导人工增雨作业

具有重要意义。

1 积层混合云宏观特征及飞行概况

1.1 探测仪器

云物理探测使用机载云粒子探测系统(Droplet Measurement Technology, DMT),包括云粒子探头(Cloud Droplet Probe, CDP),可测量 2~50 μm 直径范围的小云滴;云粒子图像探头(Cloud Imaging Probe, CIP),可测量 25~1 550 μm 直径范围的云和降水粒子;降水粒子图像探头(Precipitation Imaging Probe, PIP),可测量 100~6 200 μm 直径范围的降水粒子;气象要素探头 AIMMS-20(Aircraft Integrated Meteorological Measurement System),主要用于测量温度、相对湿度、气压、风向、风速等。

1.2 天气系统和云宏观特征

2011 年 5 月 9 日 08 时(北京时,下同),亚欧高纬度地区 500 hPa(图 1a)环流为两槽两脊型,贝加尔湖附近为一高压脊控制,脊前西北气流将携带冷空气由内蒙古中西部向山西输送,中纬度 30°~40°N 地区环流以偏西气流为主,青海和甘肃东部地区上空有高原槽东移,山西处于高原槽以东的西南气流

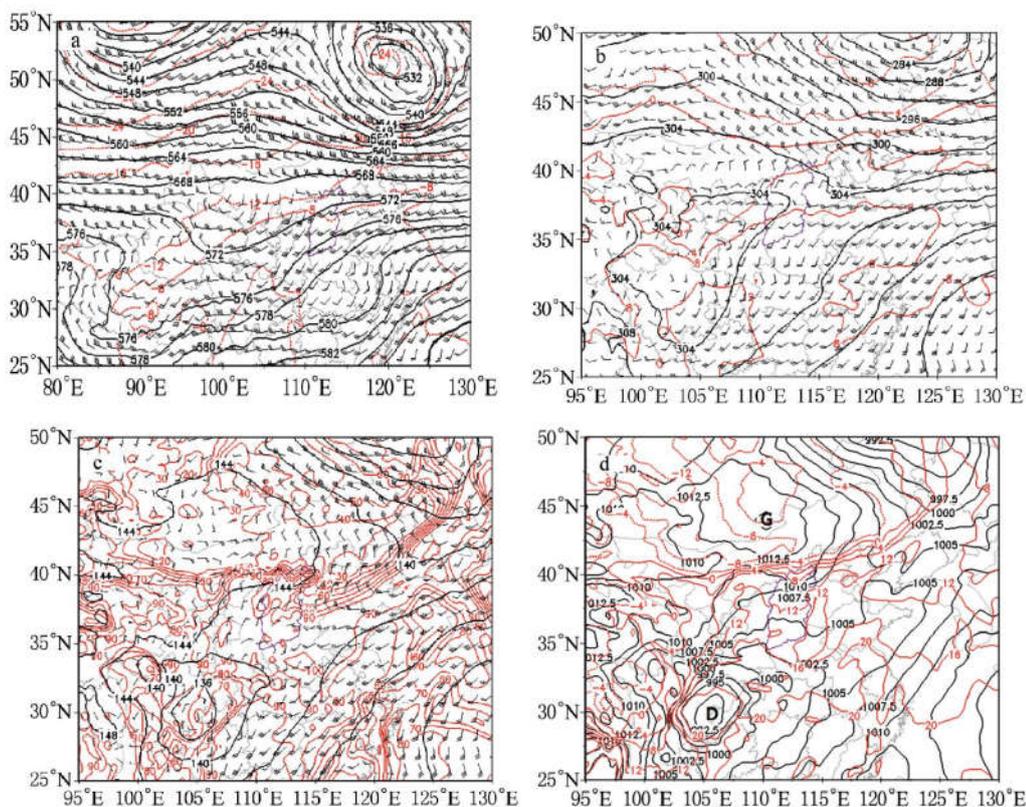


图 1 2011 年 5 月 9 日 08 时 500 hPa(a)、700 hPa(b)高度场(黑色线,单位:dgpm)、温度场(红色线,单位:°C)、850 hPa(c)高度场(黑色线,单位:dgpm)、湿度场(红色线,单位:%)及地面(d)海平面气压场(黑色线,单位:hPa)和露点温度(红色线,单位:°C)

中;对流层低层 700 和 850 hPa(图 1b、1c)上,温度锋区位于内蒙古中部,配合偏北气流为冷平流区,高原槽前正涡度平流造成的低层减压导致在四川盆地形成一个西南低涡,低涡前部有偏南气流输送暖湿空气到山西南部,700 hPa 切变线位于山西中部到陕西关中一带,850 hPa 锋区南侧形成一条明显近似东西向的干线;对应 08 时海平面气压场(图 1d),中国东北地区和西南地区为低压区,分别对应东北冷涡和西南低涡,而蒙古国中部和甘肃中部分别存在一个高压中心,且在蒙古高压前部存在一条东西向的地面干线与 850 hPa 干线对应,说明在蒙古国至内蒙古中部地区上空为干冷气团,在高空西北气流引导下,与西南低涡前部的西南暖湿气流在山西境内交汇,配合低层切变线的辐合抬升作用造成 9 日山西大部分地区出现降水天气,并且在山西中部 700 hPa 切变线附近即辐合最强的地区出现中到大雨。

由 10:18 太原多普勒雷达回波组合反射率(图 2a)可知,云系为不均匀的块状回波,雷达回波强度在 15~35 dBZ,云内有不同强度的对流云团,降水云

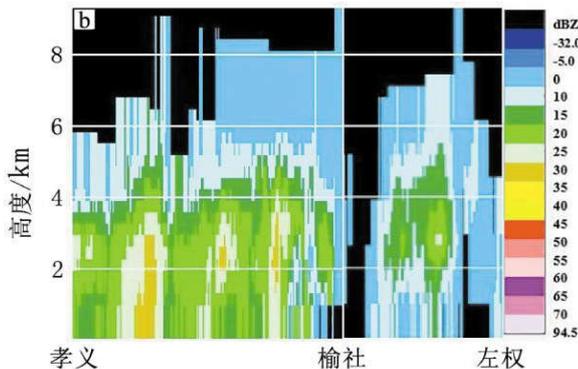
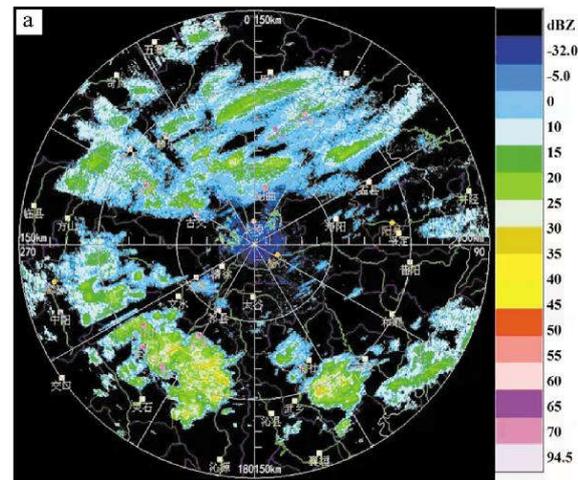


图 2 10:18 太原多普勒雷达回波组合反射率图(a)和孝义—榆社—左权雷达剖面(b)

系为典型的积层混合云。图 2b 为垂直探测阶段孝义—榆社—左权的雷达剖面图,飞机探测高度为 3.7~5.3 km,探测区域位于云系上部、云顶下方的区域。

1.3 飞行概况

为获取积层混合云不同高度层微物理参量特征,飞行中对云系展开垂直探测。飞行时段为 09:26—11:28,飞行区域为山西中部的太原、吕梁、晋中地区(图 3)。10:07:20—10:25:40 在孝义—榆社—左权开展垂直探测,探测高度为 3 723~5 324 m,探测温度为 -8.25~1.41 °C。

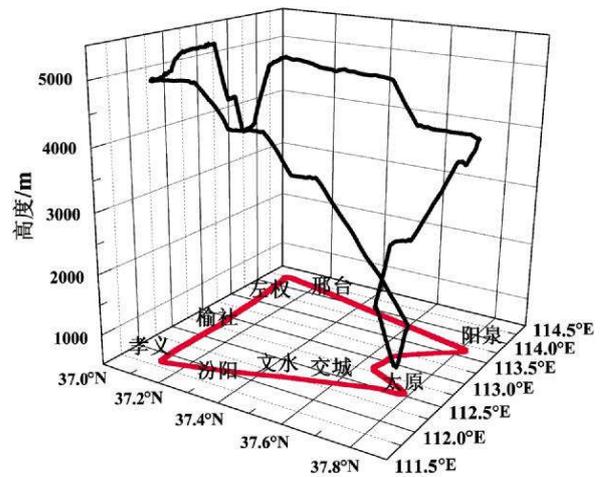


图 3 2011 年 5 月 9 日飞行轨迹
(黑线为三维轨迹,红线为对应的地面二维轨迹)

2 结果分析

2.1 积层混合云微物理特征的飞机观测

2.1.1 云微物理参量的垂直分布特征

为了分析积层混合云中不同高度、不同部位云粒子数浓度、云滴尺度、液态含水量、粒子谱、粒子形态的变化及其与温度分布的关系,将各特征参量和温度的垂直分布进行对比分析(图 4~7)。将 CDP 探测的小云粒子数浓度 $\geq 10 \text{ cm}^{-3}$ 作为入云的临界条件^[21-22]。由图 4 可知,探测 0 °C 层高度为 3 906 m,探测的大多数时段均位于 0 °C 层以上,云层内粒子以 CIP 探测的大云粒子和 PIP 探测的降水粒子为主,小云粒子仅在 4 251~4 352, 4 546~4 620, 5 000~5 324 m 三个高度范围出现,对应的温度范围分别为 -1.77~ -1.31, -2.47~-2.81, -4.9~-8.25 °C, 3 个阶段内小云粒子数浓度和液态含水量的最大值分别为 312 cm^{-3} 和 $0.157 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 345 cm^{-3} 和 $0.049 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 279 cm^{-3} 和 $0.485 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 说明积层混合云中有较为丰沛的过冷水存在,由于云中对流泡的存在,不同区域云水含量分布不均。液态含水量在 5 000~5 324 m

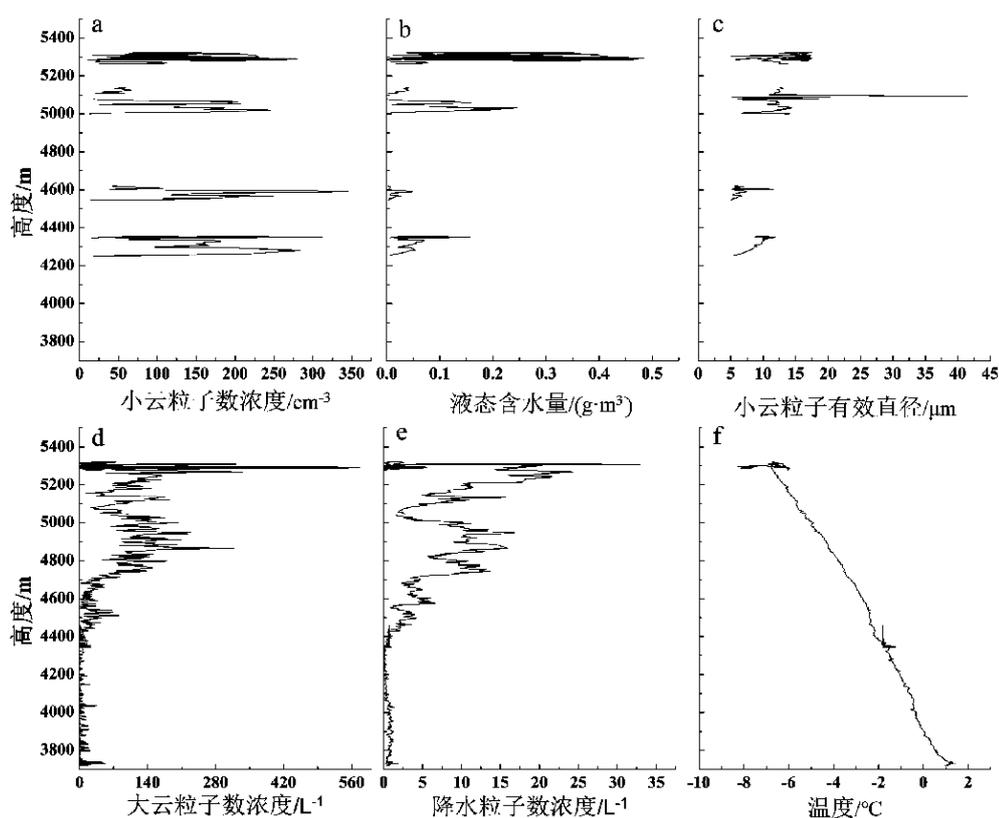


图4 垂直探测阶段的云微物理特征和温度垂直分布

(a 为 CDP 探测的小云粒子数浓度, b 为 CDP 计算的液态含水量, c 为 CDP 探测的小云粒子有效直径, d 为 CIP 探测的大云粒子数浓度, e 为 PIP 探测的降水粒子数浓度, f 为温度)

较大,可见该区域过冷水条件较好,更适合开展人工增雨作业。大云粒子和降水粒子主要在 4 400 m 以上出现,二者的变化趋势较为一致,大云粒子数浓度最大为 576 L^{-1} ,降水粒子数浓度最大为 32 L^{-1} ,均出现在 5 300 m 附近,对比该高度处 CDP 的观测结果,发现小云粒子数浓度相应出现了极大值,且粒子尺度明显变小,这可能是由于云滴的凝华增长导致的。本次对大云粒子和降水粒子数浓度的观测结果与孙玉稳等^[4]在河北积层混合云中的观测结果较为接近。

2.1.2 粒子谱的垂直分布特征

图 5 给出了 CDP、CIP 和 PIP 探测的小云粒子、大云粒子和降水粒子谱分布。小云粒子谱以单峰型为主,仅在 4 283~4 341、4 600 和 5 040 m 出现了双峰型分布(图 5a)。在 4 600 m 以下的云层中,小云粒子尺度较小,双峰型的峰值直径为 5~6 和 9 μm ,单峰型峰值直径也在 5~6 或 9~10 μm 处出现,因此 4 250~4 600 m 高度云层中这两个尺度的粒子较多。5 000 m 以上的云层中云滴尺度变大,相应的峰值直径也增大。双峰型的峰值直径分别为 10 和 16 μm ,单峰型峰值直径在 10~16 μm 均有出现。CIP 的粒子

谱分布以多峰型为主,在 225~250 μm 尺度处出现了大云粒子积聚区,且分布不均匀。图 4d 中大云粒子数浓度在 4 865 和 5 285 m 两个高度出现跃增,对比其谱分布发现 4 865 m 处的跃增是由于不同尺度粒子数均出现了增加,而 5 285 m 处主要是由于 300 μm 以下的粒子浓度增加了 1 个量级。由降水粒子谱分布(图 5c)可知,降水粒子分布在 4.3~5.3 km,粒子谱型多为单峰型,峰值直径随高度变化较大,主要在 400~1 000 μm ,其数浓度高值区与大云粒子谱高值区相对应。

2.1.3 粒子图像的垂直分布特征

温度位于 0~-20 $^{\circ}\text{C}$ 的积层混合云中冰晶形态变化很大^[23],并且粒子形态的变化能够反映云滴的形成和增长机制,因此表 1~2 给出了 CIP 和 PIP 探测的不同温度下云粒子和降水粒子图像特征。由表 1 可知,4.4~5.3 km(-2.18~-6.64 $^{\circ}\text{C}$)观测的冰晶粒子形态主要包括板状、针柱状、柱帽状、辐枝状和不规则形状,其中 5.3 km 处以板状、柱帽状和少量针柱状冰晶存在,且多为单个冰晶粒子,4.9 km 处以辐枝状和针柱状冰晶为主,聚合状和淞附状冰晶增多。4.1 km 附近飞机穿过云中融化层,可以观测到

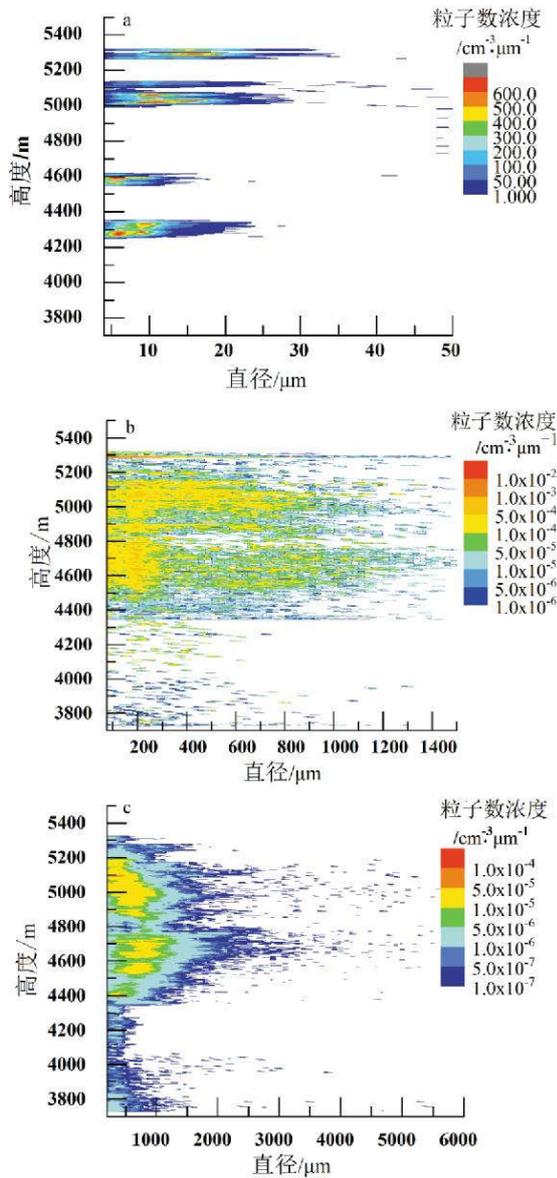


图5 粒子谱的垂直分布
(a为CDP,b为CIP,c为PIP)

更多的淞附状冰晶,随着高度的继续降低,固态冰晶全部转化为水滴。Heymsfield^[24]和Bailey^[25]等观测研究表明,板状冰晶适宜在0~4℃生成,针柱状冰晶适宜在-4~-8℃生成,而-8~-22℃为辐枝状和板状冰晶的适宜温度,柱帽状冰晶则在-18~-25℃生成,因此本次观测中5.3 km处的柱帽状冰晶和4.9 km处的辐枝状冰晶均不在适宜温度范围,可能是更高云层掉落而来。从PIP采集的降水粒子图像结果可知,在4.9 km(-4.50~-4.72℃)处,冰晶的淞附过程和聚并过程明显增加,由此可以推断该位置处于积层混合云的强回波区^[1],对比CIP和PIP观测的数浓度,4.9 km处大云粒子和降水粒子数浓度均相应出现跃增。

表1 CIP粒子图像及对应的高度、温度

高度/m	温度/℃	CIP粒子图像
5 321	-6.64	
4 956	-4.83	
4 439	-2.18	
4 151	-0.79	
4 042	-0.46	

表2 PIP粒子图像及对应的高度、温度

高度/m	温度/℃	PIP粒子图像
5 300	-6.48	
5 217	-6.34	
4 953	-4.72	
4 930	-4.50	
4 151	-0.79	
3 973	-0.31	

2.2 地面降水的雨滴谱特征

图6和图7分别给出了飞行云系下方的介休激光雨滴谱仪观测的地面降水微物理参量(数浓度、平均直径、液态含水量、雨强)和雨滴谱随时间的变化曲线,观测时段为10:23—11:26,雨滴谱数浓度、平

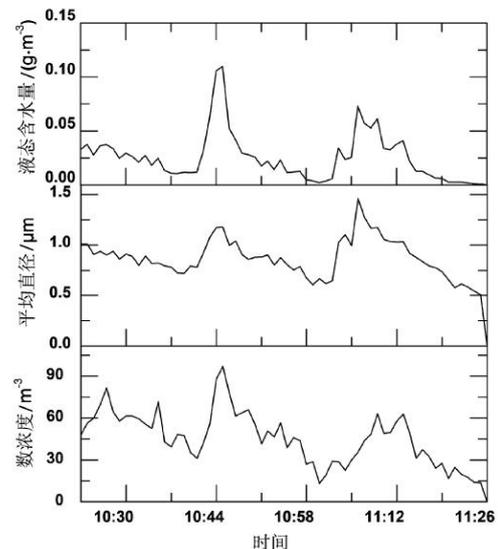


图6 介休地面雨滴谱特征参量的时间序列

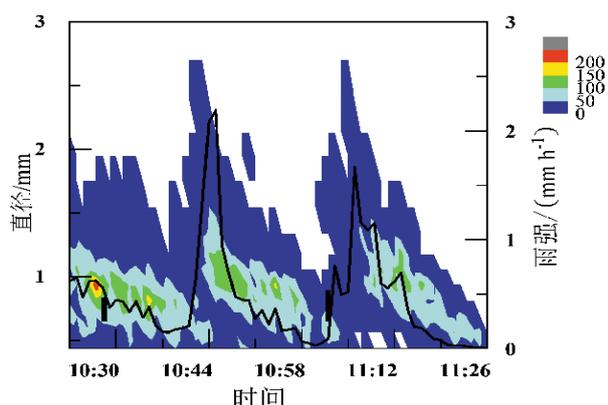


图7 介休雨滴谱分布和雨强的时间序列

均直径和液态含水量在观测时段内均呈现不均匀性,其中雨滴数浓度最大值为 96.9 m^{-3} ,液态含水量和雨强最大值分别为 0.11 g m^{-3} 和 2.19 mm/h ,均出现在 10:45,平均直径最大值为 1.46 mm ,出现在 11:06。对比雨滴谱分布的时间序列,两个时刻均伴随着雨滴谱拓宽和粒子数增多,10:45 雨滴数增加明显,11:06 尺度增加明显,从而导致数浓度和直径分别出现最大值,而雨强在两个时刻均出现极大值。由图 7 可知,雨滴谱分布呈单峰型,峰值直径多出现在 1 mm 附近。将此次观测结果与杨俊梅等^[19]对山西地区层状云降水雨滴谱观测的统计结果进行对比(表 3,图 8),发现此次降水雨强和雨滴数浓度较小,雨滴平均直径较大,雨滴平均谱分布的峰值直径也较大,这可能与层状云中存在少量的对流泡有关。

表3 雨滴谱特征参量平均值对比

	数浓度 $/\text{m}^{-3}$	平均直径 $/\text{mm}$	雨强 $/(\text{mm/h})$	液态含水量 $/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$
本次观测	44.6	0.85	0.45	0.03
汾阳观测	286.2	0.74	1.33	0.09

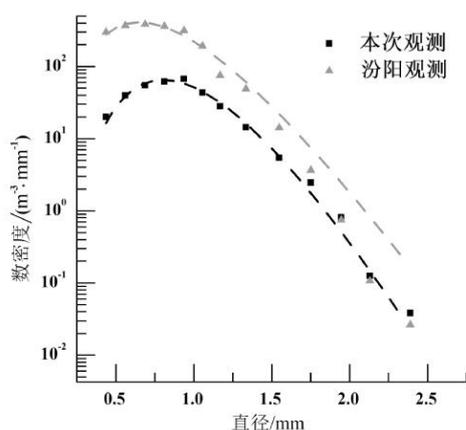


图8 雨滴平均谱分布对比

3 结论

利用 2011 年 5 月 9 日山西中部地区一次积层混合云降水的机载探测和地面雨滴谱观测资料,分析空中云系微物理结构的垂直分布、冰晶形态及演变和地面降水的微物理参量特征。主要结论如下:

(1)受地面低涡和低层切变线的共同影响,山西出现大范围降水,中部地区达到中到大雨量级。雷达回波显示降水云系为积层混合云,回波强度在 $15\sim 35 \text{ dBZ}$ 。

(2)探测区域降水云系为冷云结构,垂直分布不均匀,云中过冷水较为丰沛,对流泡的存在造成云内不同区域云水含量不均匀。云滴的凝华增长导致 $5\ 300\ \text{m}$ 处大云粒子和降水粒子数浓度明显增加。 $5\ 000\sim 5\ 324\ \text{m}$ 云系过冷水条件较好,适合在该部位开展人工增雨作业。

(3)小云粒子谱分布以单峰型为主,峰值直径主要位于 $5\sim 6$ 或 $9\sim 10\ \mu\text{m}$,大云粒子谱分布呈多峰型,不同高度处变化较大,降水粒子谱的峰值直径在 $400\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$ 。

(4)观测到的冰晶形态包括板状、针柱状、柱帽状、辐枝状和不规则形状, $4.9\ \text{km}$ 处受聚合和淞附过程的共同影响,辐枝状和针柱状冰晶增多,在 $4.1\ \text{km}$ 处的融化层附近淞附状冰晶明显增加。

(5)地面降水受到雨滴谱仪布设位置的影响,其微物理结构主要呈现层状云降水特征。

参考文献:

- [1] MATEJKA T J, HOUZE R A Jr, HOBBS P V. Microphysics and dynamics of clouds associated with mesoscale rainbands in extratropical cyclones[J]. Q J ROY METEOR SOC, 1980, 106(447): 29-56.
- [2] HOBBS P V, LOCATELLI J D. Rainbands, precipitation cores and generating cells in a cyclonic storm[J]. J Atmos Sci, 1978, 35(2): 230-241.
- [3] 汪学林, 秦元明, 吴宪君, 等. 层状云中对流泡特征及其在降水场中的作用[J]. 应用气象学报, 2001, 12(z1): 146-150.
- [4] 孙玉稳, 董晓波, 李宝东, 等. 太行山东麓一次低槽冷锋降水云系云物理结构和作业条件的飞机观测研究[J]. 高原气象, 2019, 38(5): 971-982.
- [5] 张景红, 孟辉, 于翠红, 等. 人工增雨催化响应试验分析[J]. 干旱气象, 2020, 38(6): 1043-1051.
- [6] 张佃国, 王烁, 郭学良, 等. 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, 2020, 44(5): 1042-1057.

- [7] 刘春文,郭学良,段玮,等.云南省积层混合云微物理特征飞机观测[J].应用气象学报,2022,33(2):142-154.
- [8] 亓鹏,郭学良,卢广献,等.华北太行山东麓一次稳定性积层混合云飞机观测研究:对流云/对流泡和融化层结构特征[J].大气科学,2019,43(6):1365-1384.
- [9] McFARQUHAR G M, BLACK R A. Observations of particle size and phase in tropical cyclones: implications for mesoscale modeling of microphysical processes [J]. *J Atmos Sci*, 2004, 61(4): 422-439.
- [10] CAREY L D, NIU J G, YANG P, et al. The vertical profile of liquid and ice water content in midlatitude mixed-phase altocumulus clouds [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2008, 47(9): 2487-2495.
- [11] 朱士超,郭学良.华北积层混合云中冰晶形状、分布与增长过程的飞机探测研究 [J]. *气象学报*, 2014, 72(2): 366-389.
- [12] 唐林,李琼,黎祖贤,等.一次积层混合云云系微物理结构数值模拟与增雨条件分析[J].干旱气象,2020,38(1):100-108.
- [13] 何晖,高茜,刘香娥,等.积层混合云结构特征及降水机理的个例模拟研究[J].大气科学,2015,39(2):315-328.
- [14] 陶玥,李军霞,党娟,等.北京一次积层混合云系结构和水分收支的数值模拟分析 [J]. *大气科学*, 2015, 39(3): 445-460.
- [15] 邹倩,刘奇俊,刘卫国.积层混合云结构和云微物理的数值模拟[J].干旱气象,2008,26(2):74-83.
- [16] 高茜,郭学良,何晖,等.基于飞机观测的华北积层混合云降水微物理特征的数值模拟研究[J].大气科学,2020,44(5):899-912.
- [17] 房彬,郭学良,肖辉.辽宁地区不同降水云系雨滴谱参数及其特征量研究[J].大气科学,2016,40(6):1154-1164.
- [18] 李景鑫,牛生杰,王式功,等.积层混合云降水雨滴谱特征分析[J].兰州大学学报:自然科学版,2010,46(3):56-61.
- [19] 杨俊梅,王星星,封秋娟,等.山西汾阳地区层状云和对流云降水雨滴谱特征[J].干旱气象,2017,35(3):439-445.
- [20] 王瑾,岳治国,贺文彬,等.西安地区积层混合云的 Z-R 关系研究[J].暴雨灾害,2020,39(4):409-417.
- [21] LANCE S, BROCK C A, ROGERS D, et al. Water droplet calibration of the Cloud Droplet Probe (CDP) and in-flight performance in liquid, ice and mixed-phase clouds during ARCPAC [J]. *Atmos Meas Tech*, 2010, 3: 1683-1706.
- [22] 封秋娟,牛生杰,侯团结,等.山西一次降雪云物理特征的飞机观测研究[J].大气科学,2021,45(5):1146-1160.
- [23] STITH J L, DYE J E, BANSEMER A, et al. Microphysical observations of tropical clouds [J]. *J Appl Meteor*, 2002, 41(2): 97-117.
- [24] HEYMSFIELD A J, BANSEMER A, Field P R, et al. Observations and parameterizations of particle size distributions in deep tropical Cirrus and stratiform precipitating clouds: results from in situ observations in TRMM field campaigns [J]. *J Atmos Sci*, 2002, 59(24): 3457-3491.
- [25] BAILEY M P, HALLETT J. A comprehensive habit diagram for atmospheric ice crystals: confirmation from the laboratory, AIRS II, and other field studies [J]. *J Atmos Sci*, 2009, 66(9): 2888-2899.

Observation Research on Microphysical Characteristics of Mixed Convective Stratiform Cloud Precipitation in Central Shanxi

YANG Junmei^{1,2,3}, SUN Hongping¹, TIAN Xiaoting⁴, WANG Hongxia⁵

(1. Shanxi Weather Modification Center, Taiyuan 030032 China;

2. Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081 China;

3. Shanxi Key Laboratory of Weather modification, Taiyuan 030032 China;

4. Taiyuan Meteorological Bureau, Taiyuan 030082 China;

5. Shanxi Meteorological Observatory, Taiyuan 030006 China)

Abstract This study analyzed the vertical distribution of cloud microphysical structure, ice crystal morphology, and precipitation characteristics using airborne detection and surface raindrop spectrum observation data of a convective–stratiform mixed cloud precipitation event in Central Shanxi Province on May 9, 2011. The findings indicate an inhomogeneous vertical distribution of the cold cloud, characterized by abundant supercooled water. Additionally, the presence of convective bubbles leads to variations in the liquid water content across different positions within the cloud. The deposition process at 5300 m results in a noteworthy increase in the number concentration of both cloud particles and precipitation particles. The size distribution of small cloud particles exhibits a single peak, with peak diameters ranging from 5 to 6 μm or 9 to 10 μm , whereas the size distribution of larger cloud particles is characterized by multiple peaks. The observed ice crystal morphology during this process includes plate –shaped, needle column –shaped, column cap –shaped, spoke –shaped, and irregular –shaped crystals. Aggregation and riming at 4900 m lead to the enhancement of spoke and needle column ice crystals, while riming ice crystals experience a significant increase near the melting layer at 4.1 km. The microphysical structure of the precipitation is predominantly stratiform due to the placement of the raindrop spectrometer.

Key words stratiform cloud with embedded convection; cloud microphysical characteristics; vertical structure; particle morphology