

王烁,朱文刚,张佃国,等,2024. 基于迁移学习方法的山东冷云冰晶特征分布研究[J]. 气象,50(6):733-745. Wang S, Zhu W G, Zhang D G, et al, 2024. Distribution of ice crystal characteristics of cold cloud in Shandong Province based on transfer learning method[J]. Meteor Mon, 50(6):733-745(in Chinese).

基于迁移学习方法的山东冷云冰晶特征分布研究^{*}

王 烁^{1,2} 朱文刚^{1,3} 张佃国^{1,2} 王 洪^{1,2} 王文青^{1,2}
袁雅涵^{1,4} 高荣璐^{1,5} 刘 泉^{1,2}

1 山东省气象局气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031

2 山东省人民政府人工影响天气办公室, 济南 250031

3 山东省气象科学研究所, 济南 250031

4 山东省气象数据中心, 济南 250031

5 山东省气象服务中心, 济南 250031

提 要: 为分析冷云中冰晶的分布特征,揭示冰晶增长演变机制,根据冰晶形状和尺度特征分为 8 类并进行标注,同时标注 1 类隔断栏进行数据质量控制,将 9 类标签图像整合并建立图像集,利用迁移学习 VGGNet16 方法进行识别训练,经训练模型分类准确率达 98%。将模型应用到秋季冷云冰晶特征研究中,选取 3 次积层混合云和 3 次层状云降水过程,分析冰晶形状在不同温度区间的占比及冰晶谱变化特征,结果表明,温度通过影响冰晶基面与棱面的比值来决定冰晶初始形状分布,相同温度区间积层混合云内球状冰晶和线型冰晶占比高于层状云,低于-12℃后各类冰晶占比相对固定;积层混合云内线型冰晶直径集中在 300~800 μm ,冰晶谱呈多峰分布,聚合体直径大于 600 μm ,冰晶谱首尾两端浓度相当,球状冰晶直径集中在 120~300 μm ,冰晶谱呈单调下降趋势。

关键词: 迁移学习, VGGNet16, 冰晶形状, 冰晶谱

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.041701

Distribution of Ice Crystal Characteristics of Cold Cloud in Shandong Province Based on Transfer Learning Method

WANG Shuo^{1,2} ZHU Wengang^{1,3} ZHANG Dianguo^{1,2} WANG Hong^{1,2}
WANG Wenqing^{1,2} YUAN Yahan^{1,4} GAO Ronglu^{1,5} LIU Quan^{1,2}

1 Shandong Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Jinan 250031

2 Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031

3 Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031

4 Shandong Meteorological Data Center, Jinan 250031

5 Shandong Meteorological Service Center, Jinan 250031

Abstract: In order to analyze the distribution characteristics of ice crystals in cold clouds and reveal the evolution mechanism of their growth, ice crystals are classified into 8 categories and labeled according to their shapes and sizes. At the same time, one type of partition column is labeled for data quality control. Then, the 9 types of labeled images are integrated to build an image dataset. The transfer learning VGGNet16

^{*} 山东省自然科学基金项目(ZR2020MD055、ZR2022MD040、ZR2023MD002)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J034、CXFZ2023J084)、人工智能气象应用技术创新团队(SDCXTD2023-3)和山东省气象局科研项目(2023sdqxz08、2022sdqxz13、2022SDQN03、2022sdqxm04)共同资助
2023 年 4 月 10 日收稿; 2024 年 4 月 17 日收修定稿

第一作者:王烁,主要从事云降水物理研究. E-mail: wskfg123@163.com

通讯作者:朱文刚,主要从事数值天气预报和机器学习应用研究. E-mail: zhu122812@163.com

model is adopted for identification training, and the classification accuracy of the trained model reaches 98%. The model is applied to the study of ice crystal characteristics of cold clouds in autumn. Three cumulus-stratiform mixed cloud precipitation processes and three stratiform cloud precipitation processes in 2019 are selected to analyze the proportion of ice crystal shapes in different temperature ranges and the change characteristics of ice crystal size distribution. The results show that the initial shape distribution of ice crystal is determined by the temperature's affecting the ratio of base surface to edge surface of ice crystals. In the same temperature range, the proportion of spherical ice crystals and linear ice crystals in cumulus-stratiform mixed clouds is higher than that in stratiform cloud, and the proportion of various ice crystals is relatively fixed when the temperature is below -12°C . In cumulus-stratiform mixed clouds, the diameters of linear ice crystals are concentrated in $300\text{--}800\text{ }\mu\text{m}$ with the ice crystal size distribution being multimodal. The diameters of aggregated ice crystals are greater than $600\text{ }\mu\text{m}$. The concentrations at the beginning and the end of the ice crystal spectrum are equal. The diameters of spherical ice crystals are concentrated in the range of $120\text{--}300\text{ }\mu\text{m}$, and the ice crystal size distribution shows a monotonically decreasing trend.

Key words: transfer learning, VGGNet16, ice crystal shape, ice crystal spectrum

引 言

冷云主要由冰晶和雪晶组成,冰晶浓度和冰水路径影响冷云降水效率(孙可富和游来光,1965; Zhao et al,2022),冷云降水主要来自云中高层冰相粒子融化和低层云水转化(李军霞等,2014),研究冷云冰晶分布特征,对于冷云催化和揭示复杂的内部结构具有重要意义。冰晶特征体现在粒子形状和粒径分布等方面,冷云内冰晶粒子形状多样,影响形状的因素包括云中温度、过饱和度以及复杂的增长过程(Gallagher et al,2005),温度决定冰晶基本形状(Magono and Lee,1966; Pruppacher and Klett,1997),过饱和度影响凝华增长速率(Kobayashi,1961)。早期观测发现从高云、中云到低云,随着温度升高,冰晶形状从柱状到厚板状,再到薄的六边形板状(Weickmann and Aufm Kampe,1950);人造冰云的实验观测明确了冰晶形状随温度的变化区间, $-40\sim-25^{\circ}\text{C}$ 为针、柱状冰晶, $-25\sim-10^{\circ}\text{C}$ 为六边形板状, $-9\sim-4^{\circ}\text{C}$ 为针状, $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$ 为六边形板状(Mason,1953)。在低冰面过饱和度条件下,冰晶形状变化不大,比较稳定,在较高冰面过饱和度下冰晶形状随温度有明显变化,在 $6\%\sim 8\%$ 的冰面过饱和度区内针、柱状冰晶与板状冰晶将迅速转换(王昂生和 Fukuta,1985)。冰晶与大云滴的淞附(Ono,1969)、冰雪晶间的碰撞攀附与折裂繁生(陈万奎,

1987;黄庚等,2007)使得形状变化更为复杂。冰雪晶粒径分布与降水的形成与演变过程密切相关,对于揭示云内动力及微物理机制有重要意义(杨平,1988;Jakob,2010;孙艳辉等,2023),利用机载观测的粒子数浓度和粒子质量可以拟合出冰晶谱分布,并给出相应的物理概念解释(Yano et al,2018;孙啸申等,2023)。冷云中冰晶谱可归纳为单调下降和非单调下降两大类型(陈万奎和严采繁,1987);在垂直空间存在一定变化,高层云上部谱宽较窄,随高度降低谱宽增大,层积云中部谱型与高层云中下部相似,均呈多峰分布(封秋娟等,2014);雪晶谱的谱宽同样自云的上部垂直向下变大,由于不同形状的雪晶在云中共存,谱的叠加出现多峰分布(游来光等,1965)。不同云系的冰雪晶粒子谱拓宽速率不同,由于云中过冷水(低于 0°C 未发生冻结的液态水)含量不同,积层混合云(由层云和镶嵌在层云中的对流单体组成)中对流区粒子谱下落拓宽速率约为层云区的3倍(朱士超和郭学良,2014)。除形状因素外,粒子谱型变化还与粒子密度、下落速度及冰水含量有关(Yu et al,2020)。

云粒子测量系统(DMT)可记录云中微物理参数信息(王烁等,2020),其中云粒子图像探头(CIP)可识别记录粒子图像信息。针对冰晶的几何属性(最大图像长度、周长、面积、无量纲比值等参数)有不同的形状分类方法(Rahman et al,1981;Holroyd III,1987),但准确率有待提升,如 Paul Lawson et al

(2006)等分类方法准确率为80%左右,影响准确率的主要原因在于部分冰晶的形状特征复杂,很难用有限的几个参数准确概括出来(Holroyd III, 1987)。近年来,机器学习的快速发展有效解决了图像识别中参数不足的问题,极大地推动了机器视觉(Gowsikhaa et al, 2014)领域的进步,提高了图像识别的准确率,主要分为传统的机器学习和深度学习。以支持向量机、决策树等为代表的传统机器学习算法模型,结构层次较浅,主要依靠人工特征提取,在图像处理、自然语言等高维度数据方面表现不足,泛化能力相对较差。深度学习的出现为计算机视觉及目标检测带来了新的思路,神经网络算法可以获取更深层次的图像特征,对数据集的表达更为高效和准确。特别是卷积神经网络(周飞燕等, 2017)中使用多卷积层和多池化层相结合的方式,使得模型对特征提取更加丰富,输出更加准确,同时降低信息冗余,防止过拟合。为更好识别云粒子形状,国内学者尝试将深度学习的方法应用于云粒子形状识别中,肖海霞(2020)等基于TL-ResNet152卷积神经网络建立了云粒子形状识别模型,分类准确率达96%。Wu et al(2020)等基于TL-EfficientNet-b6网络模型对冰晶形状分类,平均精度达98%。这些方法在云粒子的识别分类中取得了一定的成果,较传统的分类方法具有精度高、效率高的优势。

目前国内利用飞机探测资料对云微物理结构和降水形成机制开展了大量研究(李铁林等, 2010; 刘晴和姚展予, 2013; 王磊等, 2014a),但对于云中不同形状冰晶的分类统计工作仍较薄弱,多停留在个例分析阶段,针对不同降水云系中各形状冰晶的对比分析缺乏相应研究。利用迁移学习方法建立的模型可以快速高效识别冰晶图像并进行分类,有效解决了传统方法中准确率低、无法批处理图像的问题,可以对多架次数据中海量冰晶图像进行归纳统计。本文首先选取山东2018—2020年共计10架次飞机的云粒子图像探头(CIP)探测的2700张典型图片建立图像集,利用VGGNet16深度学习训练并建立满足精度的模型,之后将模型应用于山东秋季飞机穿云探测结果中,选取6次冷云降水过程,针对不同降水云系和同一降水云系的不同阶段、不同部位,分析冰晶形状在各个温度区间的变化特征,归纳不同冰晶形状对应的谱型特征,揭示了冷云冰晶形状

垂直演变规律及降水粒子增长机制。

1 资料介绍

1.1 观测仪器及云物理参数处理

DMT公司生产的云粒子图像探头CIP可获取云粒子信息,分辨率为15 μm,共62个档位,测量范围15~930 μm,其探测结果由其配套的软件输出,主要包括各档的粒子数浓度、总浓度、取样频率、真空速等信息,可反演粒子谱、粒子有效直径等信息。仪器利用光阵扫描测量粒子方法记录粒子图像,探测原理是当粒子通过光阵时,部分激光束被粒子遮挡,当接受光强低于正常值的50%时,认为该光电二极管被粒子遮挡,并记录为0,否则记录为1。每次记录1组0和1的状态被称为一个切片,将连续的切片拼接起来即为采集的二维粒子图像。

根据入云标准(Zhang et al, 2011)CDP浓度大于10个·L⁻¹且液态水含量大于0.001 g·m⁻³,确定云底高度和云中采样时间。通过全球定位系统和气象数据综合系统确定0℃层高度和温度区间(最低飞行温度至入云温度)。统计CIP采集冰晶浓度时,为提高数据可信度和减少测量误差(McFarquhar et al, 2007),主要统计粒子直径大于60 μm的冰晶数据。

云内液态水含量与云滴数浓度密切相关。利用热线含水仪可以测量液态水含量,但每次进云前和出云后必须进行清零操作,由于在飞行过程中存在滞后操作,且不能保证每次进出云均经过了清零后再记录,故对于长时间的云内连续观测存在局限性,因此利用CDP观测的云滴数浓度进行计算更为有效。参照DMT设备操作手册,将云滴视为球体,液态水含量计算公式如下:

$$W = \frac{\pi \rho_w}{6} \sum_{i=1}^{30} C_i d_i^3 \quad (1)$$

式中: ρ_w 表示水的密度, C_i 为云滴各档粒子数浓度, d_i 为云滴各档直径。

1.2 图像集构建

单架次飞行数据会受到飞行高度、温度及降水发展阶段的限制,无法探测到全部形态的冰晶图像,因此选取2018—2020共10个架次图像进行标注。表1为10个飞行架次的具体介绍,其中5个架次选

自春季探测,4 个架次选自秋季探测,1 个架次选自初冬探测;积层混合云探测和层状云探测架次各占 50%。高度区间为入云高度至最大飞行高度,温度区间为最低飞行温度至入云温度,冰晶图像集最大

取样高度 8000 m,最低取样温度 -30.5°C 。10 架次冰晶图像选自不同天气系统和降水云系,从中选取 2700 张图像进行标注并构建冰晶图像集,确保了样本的丰富性和代表性。

表 1 10 架次飞行情况

Table 1 Conditions for 10 flights

飞行日期(年.月.日)	天气系统	降水云系	飞行时间/BT	高度区间/m	温度区间/ $^{\circ}\text{C}$
2018.4.22	江淮气旋	积层混合云	09:38—11:28	660~5000	$-3.6\sim-9.4$
2018.4.22	江淮气旋	积层混合云	14:52—16:33	400~5200	$-5.6\sim-6.5$
2018.10.25	高空槽	层状云	15:52—17:46	2600~8000	$-30.5\sim-3.0$
2019.3.20	高空槽	层状云	08:22—10:29	2400~5100	$-8.7\sim-1.5$
2019.4.21	低层切变	层状云	07:23—09:31	4000~4600	$-4.7\sim-2.7$
2019.4.27	中支槽东移	积层混合云	13:40—15:52	3000~5800	$-11.8\sim-0.2$
2019.10.4	低槽冷锋	积层混合云	10:40—13:14	220~5400	$-5.5\sim-13.6$
2019.10.4	低槽冷锋	积层混合云	15:25—17:15	300~6000	$-8.4\sim-11.7$
2019.10.9	高空槽	层状云	16:26—18:48	2700~6000	$-8.5\sim-5.0$
2020.11.17	低空急流	层状云	17:00—18:52	200~5000	$-4.8\sim-12.0$

1.3 裁切方法及分类标准

每张 CIP 图像包含数百至上千个形状各异的冰晶粒子,无法直接对整张图像进行形状分类,需要将单张的冰晶图片裁切出来(见图 1)。具体方法如下:首先对图像进行二值化处理,将图像信息转化为 0 和 1 的数值矩阵;之后利用 bwlabel 函数判断 8 个方位的连通域是否相通,对图像进行区域分割,每个区域给定一个标签,同时删除图像中的无效区域;随后计算每个标签区域的具体坐标范围,从上到下、从左到右、从右到左逐行搜索等于 0 的行,从左到右、从右到左逐行搜索等于 0 的列,以此确定粒子遮挡区域的具体范围;最后将切割、计算好的矩阵保存并以图片形式

输出。

冰晶粒子图形种类繁多,为有效提取冰晶粒子信息,进行有关冰晶的微物理参数反演,提升对云降水过程的认识,参照 Holroyd III (1987)、王磊等 (2014b)、Wu et al(2020)方法,根据形状和尺度等特征规范分为 9 种类型(详见图 2),其中有 8 类为冰晶,第 9 类为隔断栏。微点状粒子是小于 25 个像素的点状粒子;针状冰晶是长细针结构的冰晶,通常情况下长是宽的 4 倍以上;柱状冰晶与针状冰晶结构相同,但宽度是针状冰晶的 3~5 倍;球状冰晶整体呈圆球形分布,部分球状粒子边缘粗糙或呈椭球形分布,Holroyd III (1987)定义球状粒子并非严格意义的圆球状;六边形板状(简称板状,下同)冰晶像

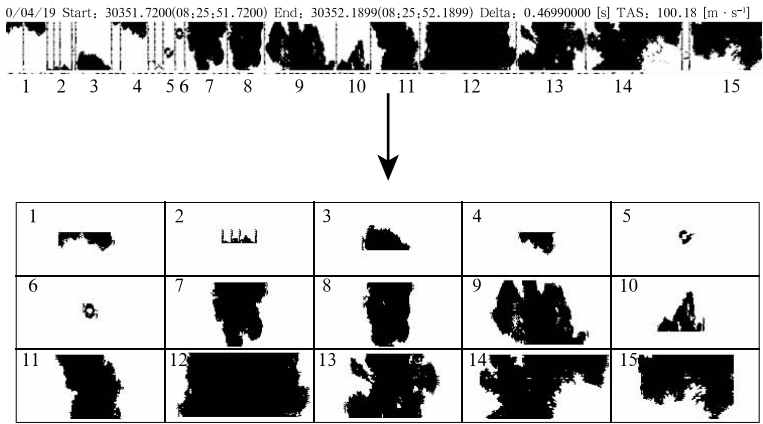


图 1 粒子裁切示意图

Fig. 1 Schematic diagram of particle cutting of ice crystals

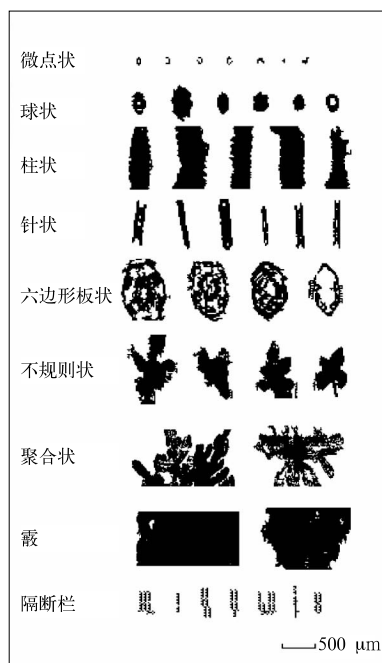


图2 9类冰晶粒子典型图像
Fig. 2 Nine types of typical images of ice crystals

素总数较大,呈六边形规则分布,边缘光滑无凸起;不规则状冰晶无特定边界规律,形状呈玫瑰花状,由少量单体碰并形成;聚合状冰晶像素总数大,边缘多呈辐枝分布,有多个冰晶单体发生聚并;霰粒子像素总数大且密集分布,结构密实,边缘光滑;隔断栏为纵向规则排列的结构。

与 Holroyd III (1987) 分类方法不同点在于增加了隔断栏, CIP 在连续拍摄过程中会用隔断栏把粒子隔开(如图1中粒子之间被隔断),因此裁切函数会把作为分隔标识的隔断栏也记录下来,在分析冷云内冰晶特征时,需要将隔断栏识别并剔除,否则隔断栏会被错误识别为针状粒子,影响统计结果。

识别并剔除隔断栏后,每张图片均为冰晶,实现质量控制。

2 AI 模型

得益于深度学习技术的快速发展和计算机图形处理器算力的大幅提高,卷积神经网络、自注意力 Transformer、生成对抗网络、图神经网络等方法在模型推理速度,面对海量的气象大数据提取时空多尺度特征,融合和挖掘不同模态之间的非线性关系方面展现了巨大的应用潜力。

2.1 VGGNet 方法

本文采用预训练 VGGNet16 网络结构进行冰晶粒子识别。VGGNet16 是牛津大学计算机视觉组 Visual Geometry Group 和 Google DeepMind 公司共同研发的一种深度卷积神经网络(图3),由13个卷积层(黑色)和3个全连接层(蓝色)共16个隐含层构成,红色为池化层,黄色为输出层,输入层为粒子图片,输出得到9种粒子类别。VGGNet16 全部使用 3×3 的卷积核和 2×2 的池化核,通过卷积和池化操作使网络结构不断加深,对图片进行压缩获得高维度上的特征图以提升预测性能,而且网络层数的增长并不会带来参数量上的爆炸(Simonyan and Zisserman, 2014)。

损失函数使用交叉熵损失函数,公式如下:

$$\text{Loss} = -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [y_i \ln \hat{y}_i + (1 - y_i) \ln(1 - \hat{y}_i)] \quad (2)$$

式中: y 表示真值, \hat{y} 表示训练模型预测值, m 表示样本总数。激活函数使用修正线性单元(ReLU)进行非线性处理,增强网络泛化能力。Loss 可以表示

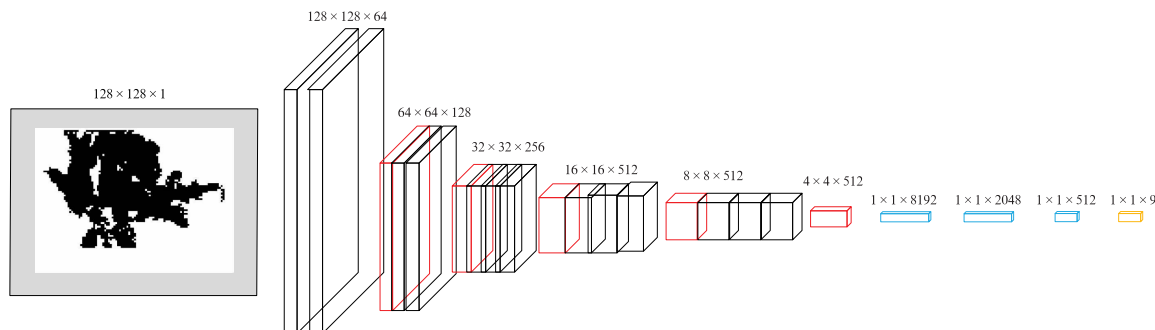


图3 深度卷积神经网络 VGGNet16 结构图
Fig. 3 Structure diagram of deep convolution neural network VGGNet16

真实概率分布与预测概率分布之间的差异,值越小表明模型预测效果越好。

2.2 检验方法

在机器学习、数据挖掘、推荐系统完成建模之后,需要对模型的效果做评价,对于分类问题常采用的评价指标有准确率(accuracy)、精确率(precision)、召回率(recall)、F1 值等,计算方法见 Wu et al (2020)。多分类问题可将一种类别看成正类,其余类别看成负类,简化为二分类问题。通常准确率、精确率、召回率和 F1 值越高,分类效果越好。精确率和召回率指标有时会出现矛盾情况,需要对其综合考虑,最常见的方法为 F1 值,该方法利用精确率和召回率对结果进行加权调和平均。F1 值的计算综合了精确率和召回率的结果,当 F1 值较高时说明试验方法有效。

2.3 迁移学习训练

随着越来越多机器学习应用场景的出现,基于人工标注的大数据监督学习取得较好表现,但气象领域人工标注数据需要具有丰富的理论经验且花费巨大时间,所以迁移学习受到越来越多的关注(Yosinski et al, 2014; Oquab et al, 2014)。迁移学习定义将某个领域或任务上学习到的知识或模式应用到不同但相关的领域或问题中,可实现从相关领域中迁移标注数据或者知识结构,达到改进目标领域或任务的学习效果。卷积神经网络通常情况下前几层网络提取图像的边缘、轮廓等特征,与具体的图像数据集关系不密切,而网络的最后几层则是与选定的标签及其任务目标紧密相关的,因此本文利用迁移学习策略,冻结 VGGNet16 网络结构的卷积层,只训练 3 个全连接层,实现训练参数的大幅减少,并且在人工标定的冰晶粒子图片数量有限的情况下,也能够取得较为理想的分类效果。

根据 1.3 小节粒子裁切方法及分类标准,建立每类粒子 300 张,共 9 类 2700 张带有分类标签的图像数据集。迁移学习训练冰晶粒子分类模型时按照 5:1 的比例将数据集随机分成训练集和测试集,且保证训练集和测试集当中每类粒子的比例相同,训练集用来训练模型,测试集用来检验模型。图 4 为基于迁移学习 VGGNet16 每一次前向计算和反向传播过程(Epoch,下文简称为轮次)上的损失和准确率。训练开始时,测试集的准确率高于训练集,测

试集的损失小于训练集损失,模型欠拟合。随着轮次的增加,模型训练集和测试集的准确率都逐渐升高,且损失都逐渐变小,仅经过 30 次迭代,模型快速收敛,最终训练集上的准确率为 0.9858,损失为 0.0654,测试集上的准确率为 0.9822,损失为 0.0712,训练集和测试集的评价指标趋于一致,模型避免了欠拟合。因此采用迁移学习预训练策略,在小数据集上训练且经过很少轮次迭代模型就能获得较好的预测性能。

图 5 为迁移学习 VGGNet16 模型在测试集上的混淆矩阵,隔断栏、霰、板状 3 种粒子类别识别完全正确;聚合状 50 个粒子识别出 49 个,1 个被错误

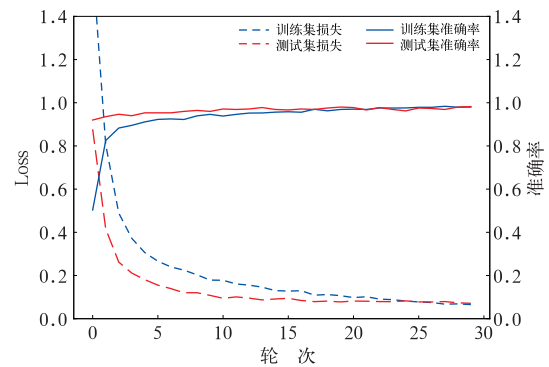


图 4 基于迁移学习的 VGGNet16 训练时每轮次的损失函数和准确率

Fig. 4 Loss function and accuracy of each round of VGGNet16 training based on transfer learning

真实类别	聚合状	49	0	0	0	0	1	0	0	0
	隔断栏	0	50	0	0	0	0	0	0	0
	柱状	0	0	48	0	0	0	2	0	0
	霰	0	0	0	50	0	0	0	0	0
	板状	0	0	0	0	50	0	0	0	0
	不规则状	0	0	0	0	2	48	0	0	0
	针状	0	0	1	0	0	0	49	0	0
	球状	0	0	0	0	1	0	0	49	0
	微点状	0	1	0	0	0	0	0	0	49
		聚合状	隔断栏	柱状	霰	板状	不规则状	针状	球状	微点状
		预测类别								

图 5 基于迁移学习的 VGGNet16 模型在验证集的混淆矩阵

Fig. 5 Confusion matrix of VGGNet16 model in verification set based on transfer learning

识别成不规则状;柱状 50 个粒子识别出 48 个,2 个被错误识别成针状;不规则状 50 个粒子识别出 48 个,2 个被错误识别成板状;针状 50 个粒子识别出 49 个,1 个被错误识别成柱状;球状 50 个粒子识别出 49 个,1 个被错误识别成板状;微点状 50 个粒子识别出 49 个,1 个被错误识别成隔断栏。

表 2 为基于迁移学习的 VGGNet16 模型在测试集的检验结果,霰粒子精确率、召回率和 F1 值均为 1.00,说明模型对霰粒子具有完全正确识别能力;隔断栏和板状粒子召回率均为 1.00,精确率略低,说明模型能够完全识别出隔断栏和板状粒子本身,但模型会把其他粒子错误识别成隔断栏或板状粒子;聚合状、球状和微点状粒子精确率均为 1.00,召回率略低,说明模型不会把别的粒子错误识别成聚合状、球状或微点状粒子,但会把聚合状、球状或微点状粒子错误识别成其他粒子;柱状、不规则状和针状粒子无论是精确率还是召回率均小于 1.00,说明模型既会把柱状、不规则状和针状粒子错误识别成其他粒子,也会把其他粒子错误识别成柱状、不规则状或针状粒子。总的来说,基于迁移学习的 VGGNet16 冰晶粒子识别模型在测试集上的准确率为 0.9822,具有较高的冰晶粒子识别能力,可用于分析山东冷云冰晶的特征分布。

表 2 基于迁移学习的 VGGNet16 模型在测试集的检验结果

Table 2 Test results of VGGNet16 model based on transfer learning in test set				
粒子类型	精确率	召回率	F1 得分	样本数/个
聚合状	1.00	0.98	0.99	50
隔断栏	0.98	1.00	0.99	50
柱状	0.98	0.96	0.97	50
霰	1.00	1.00	1.00	50
板状	0.94	1.00	0.97	50
不规则状	0.98	0.96	0.97	50
针状	0.96	0.98	0.97	50
球状	1.00	0.98	0.99	50
微点状	1.00	0.98	0.99	50

3 冰晶分布特征

3.1 降水云系宏微观特征

表 3 给出了 6 次山东省秋季降水过程的宏微观云物理参数信息。2019 年 10 月 4 日、6 日分别受低槽冷锋和西风槽影响,全省出现大范围降水的积层混合云系。10 月 16 日、24 日受高空槽影响,鲁西北和鲁西南局部地区出现降水,探测区域以层状云为主。统计了探测区域内降雨量信息,3 h 累计降雨量表明 6 个飞行架次均产生了不同强度的降水。

表 3 2019 年 6 次降水过程宏微观物理参数信息

Table 3 Macro and micro physical parameters during six typical precipitation processes in 2019										
架次 编号	日期 (月、日)	时间/BT	云中采样 时间/s	云底 高度/m	0℃层 高度/m	最大飞行 高度/m	温度 区间/℃	液态水含量 (g·m ⁻³)	冰晶浓度 (个·L ⁻¹)	3 h 累计 降雨量/mm
1	10.4	10:40—13:14	2806	220	4200	5357	-5.5~13.6	0.12	130	1.0
2	10.4	15:25—17:15	2252	290	4000	5972	-8.4~11.7	0.08	83	4.0
3	10.6	09:56—12:30	797	3200	3680	5359	-7.5~5.6	0.06	0.4	3.5
4	10.6	14:26—17:38	632	1510	3300	6286	-10.6~6.1	0.06	7.4	1.9
5	10.16	08:25—11:04	256	2710	2750	6252	-17.0~-0.1	0.03	1.5	0.2
6	10.24	15:25—16:51	121	1700	2900	6183	-21.3~6.2	0.02	0.15	0.2

由表 3 可见,10 月 4 日积层混合云发展旺盛,云内采样时间较长,时长分别为 2806 s 和 2252 s,液态水含量较高,最大为 0.49 g·m⁻³,冰晶浓度较大,最大可达 1026 个·L⁻¹,飞机采集高度区间分别为 220~5357 m 和 290~5972 m,两次飞行过程均未到达云顶。10 月 16 日、24 日为层状云探测,对比发现层状云发展稳定,0℃层高度基本在 3000 m 左右,积层混合云受对流影响,0℃层高度抬升。层状云内液态水含量和冰晶浓度均低于积层混合云,粒子主要集中在-5℃以上,-7℃达到浓度峰值。图 6 为表 3 中 6 次飞行轨迹与雷达回波叠加信息,

图中黑色实线为飞行轨迹。分析可见,图 6a 探测区域为积层混合云前部,云系处于发展阶段,对流逐渐增强;图 6b 探测部位为积层混合云中后部,航线上仍存在少量超过 35 dBz 的强回波区,但回波具有不稳定性;图 6c 为积层混合云前部,与图 6a 比较,降水云系覆盖范围更大,存在不连续的强中心,强中心回波强度最大可为 40 dBz;图 6d 位于积层混合云边缘,基本为云系的层状云部分,回波较为均匀,基本在 25 dBz 以下;图 6e 属于层状云探测,回波较弱且均匀,回波强度在 15~25 dBz;图 6f 为高层云探测,航线上几乎没有雷达回波,在东营市(37.4°N、118°E)

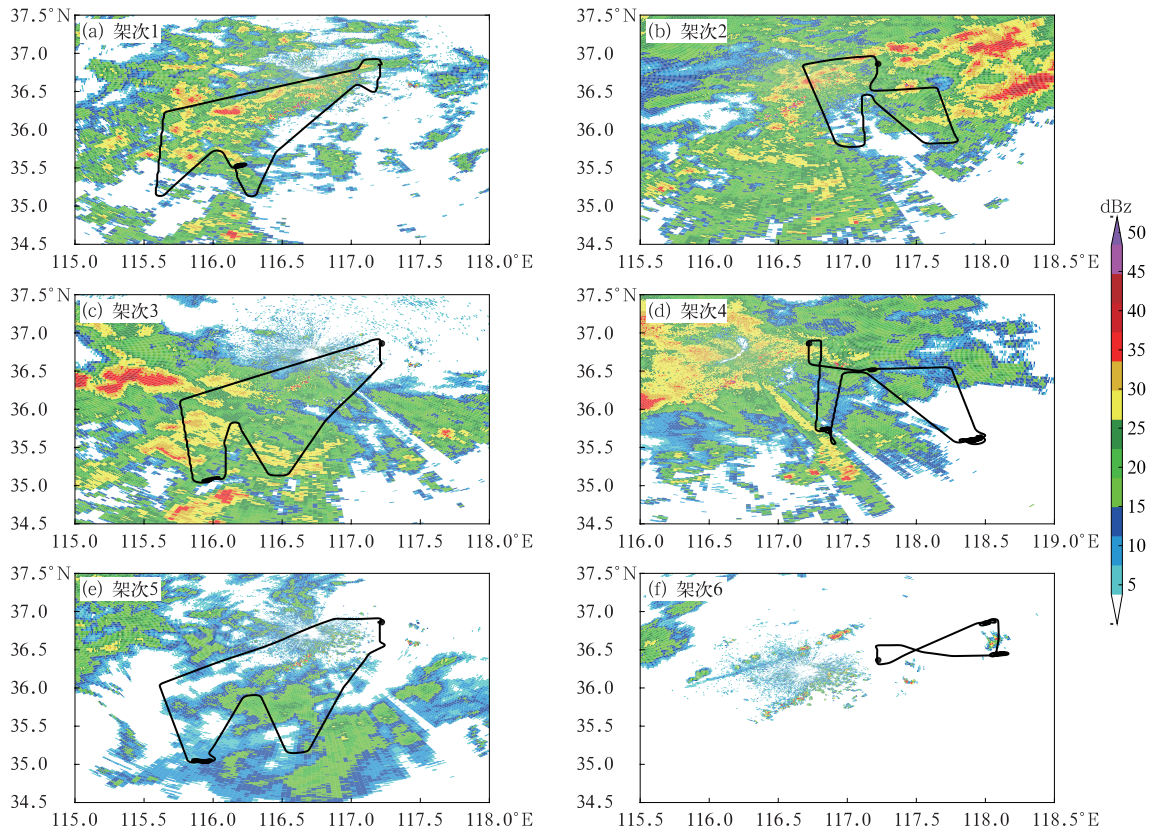


图 6 表 3 中各架次飞行轨迹(黑线)与地基雷达回波(填色)叠加图

Fig. 6 Flight trajectories (black line) and ground-based radar echoes (colored) of each flight in Table 3

上空入云,测到了一定的云粒子,雷达回波强度在 20 dBz 左右。

综上所述,图 6a~6c 的三次探测为积层混合云系弱对流区,图 6d~6f 的探测云系为层状云,虽然不同云系的雷达回波差异较大,但地面均产生了降水,说明高空中有降水粒子生成、增长和掉落的过程,飞机探测到一定的冰晶浓度也证实了不同降水云系中均存在冰相粒子,可以分析冰晶形状在不同温度区间的变化特征。

3.2 不同温度区间的冰晶特征

冰晶粒子的增长与温度密切相关,实验表明

(Aufm Kampe et al,1951)冰晶结构随温度的变化有明显的顺序,温度从 0℃降至-25℃时,冰晶形状的演变依次为:六边形板状→柱状→六边形板状→柱状,且不同形状的冰晶增长速率不同。参照(Hallett and Mason,1958)的标准,考虑-3℃和-8℃是冰晶形状变化的临界温度,将温度区间划分为表 4 的 6 个温度区间,可以反映冰晶形状的变化特征。结合 VGGNet16 分类方法,统计分析了各类降水云系中不同温度区间冰晶形状的占比(详见图 7),对比积层混合云与层状云内冰晶特征的异同点。采集不同温度区间冰晶样本数见表 4。

在-3~0℃区间,球状冰晶占主要比例,架次 1

表 4 不同温度区间冰晶样本数

Table 4 Number of ice crystal samples in different temperature sections

温度区间/℃	球状	柱状	针状	六边形板状	不规则状	聚合状	霰
-3~0	16 243	2422	1098	1115	4544	302	800
-5~-3	31 898	6134	20 519	5379	9340	759	1246
-8~-5	21 234	4470	2764	4493	13 181	1158	1627
-12~-8	6917	1889	1041	1777	5615	405	350
-16~-12	6476	1333	662	909	5694	159	22
-25~-16	16 259	2405	1268	2165	10 455	92	59

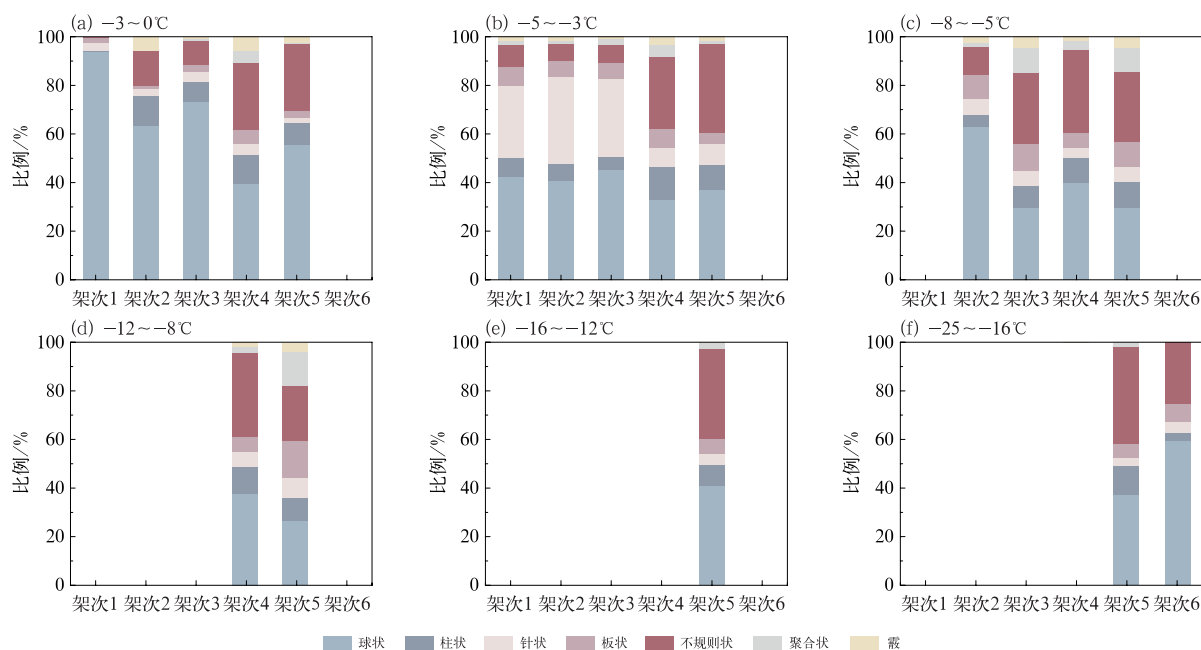


图7 6架次探测冰晶形状在不同温度区间比例分布

(a~c)积层混合云降水,(d~f)层状云降水

Fig. 7 Proportional distribution of ice crystal shape in different temperature ranges detected by six sorties

(a~c) cumulus-stratiform cloud precipitation, (d~f) stratiform cloud precipitation

占比最大,达93.9%。融化过程中冰粒子形成类球状不断掉落,部分可能完全融化成水滴被识别成球状冰粒子,从而增加了占比。此外可能存在 0°C 层附近的粒子输送,架次1和架次3处于积层混合云降水的系统前部,发展阶段的云系在 0°C 层附近存在一定上升气流($1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),部分暖区(融化层以下区域)雨滴被抬升到冷区,被记录为球状冰晶。架次2处于积层混合云成熟到消散阶段,除了球状冰晶外还存在较多高层掉落的不规则状和柱状冰晶。架次4处于积层混合云边缘的层云区,架次5处于层状云发展阶段,2个架次探测到的各类冰晶占比相似。

在 $-5 \sim -3^{\circ}\text{C}$ 区间,针状、柱状冰晶(统称线型冰晶,下同)比例有了显著提升,积层混合云内线型冰晶比例分别为37.6%、43.0%、37.2%,比 $-3 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 区间分别提高了33.8%、27.6%、24.9%,层状云中线型冰晶比例也有了一定提升,分别提高了5.0%和8.3%。Kobayashi-Pruppacher模式指出冰晶初始形状特征由基面最大尺度和棱面高度的比值决定(王昂生和Fukuta,1984),在 $-5 \sim -3^{\circ}\text{C}$ 区间内基面最大尺度远小于棱面高度,因此对于基面而言更易进行水汽扩散,形成一个净输送环境,冰晶开始向针状优先发展。相较于层云区,对流区内的

针状冰晶占比大,即冰晶形状特征更显著,占比结果更符合Kobayashi-Pruppacher模式结论。

在 $-8 \sim -5^{\circ}\text{C}$ 区间,针状冰晶占比减小,柱状冰晶占比在10.0%左右,根据修订的冰晶定量增长结果,该温度区间内基面最大尺度与棱面高度的比值介于0.1~1,冰晶优先向针、柱状发展。4个架次均测到了聚合体,架次3和架次5中的聚合体占比分别为10.0%和9.8%,聚合体的出现表明冰晶掉落过程存在落速差,云中垂直风速的变化及凇附增长过程会导致冰晶掉落速度不同。AIMMS探头可以记录云中垂直风速的变化情况,在 $-8 \sim -5^{\circ}\text{C}$ 区间4个架次的垂直风速均有显著的变化,既存在上升气流,也有一定的下沉气流,动力扰动会促使不规则冰晶之间相互攀附,形成聚合状。此外凇附增长过程也会引起冰晶落速差异,部分冰晶碰并一定过冷水滴后会引形状和落速改变,4个架次测得过冷水含量平均值分别为0.04、0.06、0.02、0.02 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最大值分别为0.21、0.18、0.10、0.05 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,过冷水含量较丰富,有利于冰晶的增长。

对比 $-12 \sim -8^{\circ}\text{C}$ 与 $-8 \sim -5^{\circ}\text{C}$ 区间的粒子占比,架次5所测的板状冰晶占比从10.3%提高到15.5%。板状冰晶增多是由于在 $-12 \sim -8^{\circ}\text{C}$ 区间基面最大尺度与棱面高度的比值介于2~10,棱面

的表面相对扩散速率快于基面,水汽向棱面扩散发展,冰晶的初始形态表现为板状的平面冰晶。在 $-12\sim-8^{\circ}\text{C}$ 温度区间内过冷水含量低(约 $0.001\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$),板状冰晶以凝华增长方式为主。

在 $-25\sim-12^{\circ}\text{C}$ 区间内,冰晶形态以不规则状和球状为主,未测到过冷水,相对湿度平均值为 52% ,不规则状冰晶以凝华增长为主,球状粒子主要来源于脆弱冰晶的破裂。在 -25°C 附近基面最大尺度与棱面高度的比值趋向于 1 ,几乎不随温度变化,因此在该温度范围内冰晶形状变化缓慢,各类冰晶占比相对固定。

3.3 不同形状冰晶的谱型特征

冷云内冰晶形状和尺度差异大,研究不同形状冰晶的谱型特征,对于揭示冰晶粒子增长机制具有重要意义,本文重点分析积层混合云内线型冰晶、聚合体、球状冰晶三类典型降水粒子的谱型,图 8a~8c 分别对应线型冰晶谱、聚合体谱和球状冰晶谱,均为瞬时谱。首先分析线型冰晶谱特征,瞬时谱数据选自表 5 中 4 个采样时刻,所有采样数据均来自于架次 3,线型冰晶的采样主要来自于积层混合云系发展阶段,采样温度在 $-5\sim-4^{\circ}\text{C}$,表 5 给出了每个时刻采集的冰晶总个数及线型冰晶的个数、比例,4 个时刻线型冰晶占比均超过了 50% ,最大占比为 69% 。线型冰晶的直径利用图像横纵坐标的最小二乘法拟合计算(张荣等,2021),发现直径主要集中在

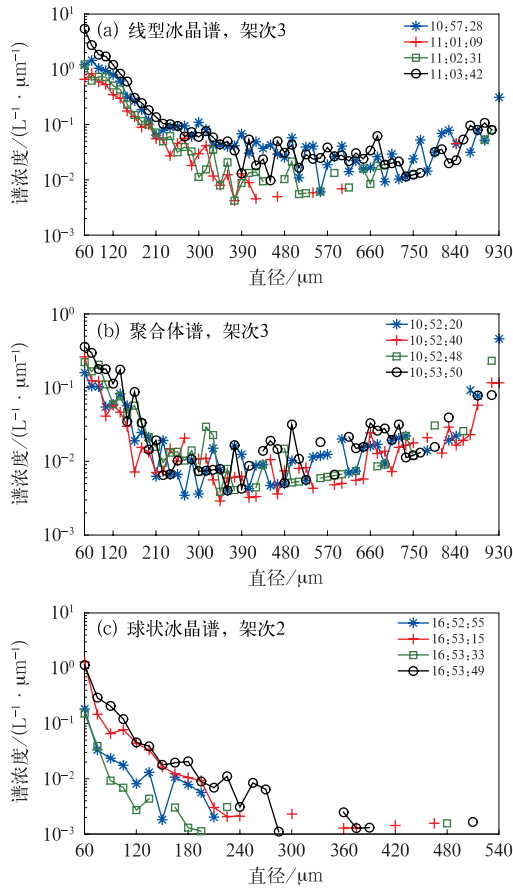


图 8 不同形状冰晶对应谱型
(a)线型冰晶谱,(b)聚合体谱,(c)球状冰晶谱
Fig. 8 Spectrum of ice crystals in different shapes
(a) linear spectrum, (b) aggregate spectrum, (c) sphere spectrum

表 5 架次 3 中线型冰晶采样统计

Table 5 Linear ice crystal sampling statistics in Flight 3

采样时刻/BT	冰晶总数/个	线型冰晶数量/个	线型冰晶比例/%	不同直径线型冰晶比例/%		
				$<300\text{ }\mu\text{m}$	$300\sim800\text{ }\mu\text{m}$	$>800\text{ }\mu\text{m}$
10:57:28	143	99	69	16	75	9
11:01:09	204	130	64	14	73	13
11:02:31	171	92	54	11	73	16
11:03:42	175	106	61	27	67	6

$300\sim800\text{ }\mu\text{m}$,少量冰针直径在 $300\text{ }\mu\text{m}$ 以内。4 个时刻累计采集线型冰晶 427 个,最小直径 $147\text{ }\mu\text{m}$,最大直径 $1059\text{ }\mu\text{m}$ 。

图 8a 对应表 5 不同采样时刻的瞬时谱型,为减小光学限制和破碎效应(Korolev et al,2013)带来的误差,仅统计直径大于 $60\text{ }\mu\text{m}$ 的冰晶粒子。可以看出直径低于 $300\text{ }\mu\text{m}$ 范围,谱浓度基本呈单调下降趋势; $300\sim800\text{ }\mu\text{m}$ 范围,谱浓度呈多峰分布,与游来光等(1965)观测的冰针谱特征一致,多峰分布

表明采样体积内存在各种尺度的线型冰晶,冰晶浓度不均匀导致峰值起伏。

聚合体是多个冰晶相互碰并粘连而形成的大尺度降水粒子,具有一定的下落末速度,穿过 0°C 层后融化产生降水,冰晶碰并形成聚合体的过程是降水粒子增长的一种重要形式(Houghton,1950)。采样数据选自架次 3,采样温度在 -5°C ,表 6 记录了 4 个采样时刻的冰晶信息,每个时刻内聚合体占比约 30% 。聚合体中超过 50% 分布在 $600\sim1000\text{ }\mu\text{m}$ 范

围,另有部分聚合体直径超过 1000 μm 。4 个时刻 径 1456 μm 。
累计采集聚合体 145 个,最小直径 422 μm ,最大直 图 8b 对应表 6 不同时刻瞬时谱型,由于采集样

表 6 架次 3 聚合体采样统计
Table 6 Aggregate sampling statistics in Flight 3

采样 时刻/BT	冰晶 总数/个	聚合体 数量/个	聚合体 比例/%	不同直径聚合体比例/%		
				<600 μm	600~1000 μm	>1000 μm
10:52:20	219	66	30	29	59	12
10:52:40	117	35	30	11	55	34
10:52:48	63	20	32	16	56	28
10:53:50	70	24	34	29	50	21

本中存在破碎冰晶,直径小于 100 μm 时谱浓度超过 $10^{-1} \text{ L}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,相比图 8a 低 1 个量级,谱型上多峰分布特征不明显,多处出现中断。随着大尺度聚合体数量增多,粒子谱型中首尾两端粒子谱浓度相当,聚合体有利于粒子谱型拓宽和大尺度冰晶的谱浓度增长。

球状冰晶通过水汽凝华进行增长,形状特征与雨滴相似,可利用温度区间进行区分。采样数据选

自架次 2,降水处于成熟到消散阶段,采样温度在 $-1\sim 0^{\circ}\text{C}$,表 7 记录了 4 个采样时刻的冰晶信息,相较于其他形状的冰晶,球状冰晶在采集的总冰晶数内占比大,基本达 80% 以上,采样中包含了一些融化的雨滴。球状冰晶直径较小,集中分布在 120~300 μm ,4 s 内累计采集球状冰晶 513 个,最小直径 86 μm ,最大直径 466 μm 。

图 8c 对应表 7 不同时刻瞬时谱型,不同于线型

表 7 架次 2 球状冰晶信息统计
Table 7 Sphere ice crystal sampling statistics in Flight 2

采样 时刻/BT	冰晶 总数/个	球状冰晶 数量/个	球状冰晶 比例/%	不同直径球状冰晶比例/%		
				<120 μm	120~300 μm	>300 μm
16:52:55	150	133	89	3	89	8
16:53:15	185	182	98	1	93	6
16:53:33	104	81	79	4	88	8
16:53:49	138	114	83	2	79	19

冰晶和聚合体,球状冰晶直径较小,60~120 μm 范围内,谱浓度呈连续单调下降;120~300 μm 范围内,谱浓度变化平稳,整体呈下降趋势,但量值变化不大,部分时刻的谱型出现中断;超过 300 μm 后,谱型不再连续,间隔出现散点。

4 结论和讨论

本文利用基于迁移学习的 VGGNet16 模型对山东秋季冷云冰晶进行分类训练,选取 2018—2020 年共 10 个架次的数据构建冰晶图像集,根据图像形状和尺度等参数分为 9 类,模型分类准确率达 98%。通过分析 3 次积层混合云中的对流区和 3 次层状云内的机载探测冰晶图像,揭示探测云系在不同温度区间内冰晶形状连续变化规律和不同形状冰晶的谱型特征,结论如下:

(1) 相较于传统分类方法,基于迁移学习的

VGGNet16 模型准确率更高,通过多种评估变量对模型进行评估,经过 30 次迭代,模型最终训练集上的准确率为 0.9858, Loss 为 0.0654,测试集上的准确率为 0.9822, Loss 为 0.0712,模型有效避免了欠拟合。

(2) 温度影响冰晶形状分布, $-3\sim 0^{\circ}\text{C}$ 区间球状冰晶占主要比例; $-8\sim -3^{\circ}\text{C}$ 区间线型冰晶比例显著提升,相较于层状云,对流区内的线型冰晶占比更大,冰晶形状特征更符合 Kobayashi-Pruppacher 模式结论; $-12\sim -8^{\circ}\text{C}$ 区间板状冰晶占比有所提高; $-25\sim -12^{\circ}\text{C}$ 区间各类冰晶占比相对固定。

(3) 积层混合云内线型冰晶直径集中在 300~800 μm ,谱型呈多峰分布,冰晶浓度不均匀导致峰值起伏。聚合体超过 50% 分布在 600~1000 μm 范围,另有部分聚合体直径超过 1000 μm ,冰晶谱多峰分布特征不明显,首尾两端粒子谱浓度相当。球状冰晶直径集中分布在 120~300 μm 范围,谱浓度变

化平稳,整体呈下降趋势。

在分析温度区间与冰晶形状占比过程中,相较于传统云室实验,飞机观测会存在一定的结果误差。自然云降水是一个复杂的过程,特别是冷云内的冰晶形态分布,在同一温度区间内冰晶会进行凝华、碰并等增长及破碎过程,还存在高层冰晶掉落,因此本文的统计结果具有一定不确定性,今后需要增加研究个例和采样数目,归纳主要特征。

参考文献

- 陈万奎,1987.枝状雪晶碰撞攀附与折裂增生[J].气象科学研究院院刊,2(1):74-80. Chen W K,1987. The multiplication generated by dendritic snow crystals collision and aggregation[J]. J Acad Meteor Sci,2(1):74-80(in Chinese).
- 陈万奎,严承纂,1987.云中冰晶尺度谱特征与分布函数[J].气象,13(11):13-17. Chen W K, Yan C F,1987. The size distribution of ice crystals within clouds[J]. Meteor Mon,13(11):13-17(in Chinese).
- 封秋娟,李培仁,侯团结,等,2014.山西春季一次层状冷云的微物理结构特征[J].大气科学学报,37(4):449-458. Feng Q J, Li P R, Hou T J, et al,2014. Microphysical characteristics of spring precipitation cold stratiform clouds in Shanxi Province[J]. Trans Atmos Sci,37(4):449-458(in Chinese).
- 黄庚,苏正军,关立友,等,2007.冰雪晶碰并勾连增长的实验与观测分析[J].应用气象学报,18(4):561-567. Huang G, Su Z J, Guan L Y, et al,2007. Observation and analysis of the aggregation growth among ice-snow crystals[J]. J Appl Meteor Sci,18(4):561-567(in Chinese).
- 李军霞,李培仁,陶玥,等,2014.山西春季层状云系数值模拟及与飞机探测对比[J].应用气象学报,25(1):22-32. Li J X, Li P R, Tao Y, et al,2014. Numerical simulation and flight observation of stratiform precipitation clouds in spring of Shanxi Province[J]. J Appl Meteor Sci,25(1):22-32(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).
- 刘晴,姚展予,2013.飞机增雨作业物理检验方法探究及个例分析[J].气象,39(10):1359-1368. Liu Q, Yao Z Y,2013. On physical evaluation of aircraft cloud seeding and case study[J]. Meteor Mon,39(10):1359-1368(in Chinese).
- 孙可富,游来光,1965.1963年4—6月吉林地区降水性层状冷云中的冰晶与雪晶[J].气象学报,37(3):265-272. Sun K F, You L G,1965. Ice crystals and snow crystals in precipitating stratiform cold clouds in the Jilin Area during April—June 1963[J]. Acta Meteor Sin,37(3):265-272(in Chinese).
- 孙啸申,周学思,樊嵘,等,2023.张家口2019年11月29日降雪天气的毫米波雷达和飞机观测分析[J].气象,49(8):958-971. Sun X S, Zhou X S, Fan R, et al,2023. Analysis of a snowfall event at Zhangjiakou on 29 November 2019 based on Ka-band millimeter-wavelength radar and aircraft observations[J]. Meteor Mon,49(8):958-971(in Chinese).
- 孙艳辉,张波,刘伟,等,2023.高空冷涡背景下飞机积冰特征和机制的探测研究[J].气象,49(8):972-984. Sun Y H, Zhang B, Liu W, et al,2023. Study on the characteristics and mechanism of aircraft ice accumulation under the background of upper-air cold vortex[J]. Meteor Mon,49(8):972-984(in Chinese).
- 王昂生, Fukuta N,1984.冰晶增长规律的定量研究[J].大气科学,8(3):242-251. Wang A S, Fukuta N,1984. The quantitative studies on the growth law of ice crystal[J]. Sci Atmos Sin,8(3):242-251(in Chinese).
- 王昂生, Fukuta N,1985.低冰面过饱和度区冰晶增长特征[J].气象学报,43(3):370-377. Wang A S, Fukuta N,1985. Characteristics of ice crystal growth in the low ice supersaturation zone[J]. Acta Meteor Sin,43(3):370-377(in Chinese).
- 王磊,李成才,赵增亮,等,2014a.飞机积冰云微物理特征分析及监测技术研究[J].气象,40(2):196-205. Wang L, Li C C, Zhao Z L, et al,2014a. Microphysical property analysis and detection of air icing clouds[J]. Meteor Mon,40(2):196-205(in Chinese).
- 王磊,李成才,赵增亮,等,2014b.二维粒子形状分类技术在云微物理特征分析中的应用[J].大气科学,38(2):201-212. Wang L, Li C C, Zhao Z L, et al,2014b. Application of 2D habit classification in cloud microphysics analysis[J]. Chin J Atmos Sci,38(2):201-212(in Chinese).
- 王烁,张佃国,郭学良,等,2020.利用机载探测设备研究云中零度层附近云雷达反射率与液态含水量的关系[J].海洋气象学报,40(2):103-112. Wang S, Zhang D G, Guo X L, et al,2020. Research on correlation between reflectivity and liquid water content around the 0 °C layer in the clouds by airborne detection equipments[J]. J Marine Meteor,40(2):103-112(in Chinese).
- 肖海霞,2020.华北地区云中冰晶粒子的形状类别和增长演变机制研究[D].南京:南京信息工程大学. Xiao H X,2020. Research on shape types and growth evolution mechanism of ice crystals in natural clouds over North China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 杨平,1988.贵州夏季自然云中冰雪晶和大粒子观测结果的分析[J].高原气象,7(2):126-134. Yang P,1988. The analyses of the observations of ice and snow crystals and large hydrometeor particles within natural clouds in summer over Guizhou Province[J]. Plateau Meteor,7(2):126-134(in Chinese).
- 游来光,熊光莹,高明忍,等,1965.春季吉林地区层状冷云中冰晶的形成与雪晶增长特点[J].气象学报,35(4):423-433. You L G, Xiong G Y, Gao M R, et al,1965. Characteristics of ice crystal formation and snow crystal growth in stratiform cold clouds in Jilin region during spring[J]. Acta Meteor Sin,35(4):423-433(in Chinese).
- 张荣,李宏宇,周旭,等,2021.DMT机载云粒子图像形状识别及其应用[J].应用气象学报,32(6):735-747. Zhang R, Li H Y, Zhou X, et al,2021. Shape recognition of DMT airborne cloud particle

- images and its application[J]. *J Appl Meteor Sci*, 32(6): 735-747 (in Chinese).
- 周飞燕, 金林鹏, 董军, 2017. 卷积神经网络研究综述[J]. *计算机学报*, 40(6): 1229-1251. Zhou F Y, Jin L P, Dong J, 2017. Review of convolutional neural network[J]. *Chin J Comput*, 40(6): 1229-1251 (in Chinese).
- 朱士超, 郭学良, 2014. 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*, 72(2): 366-389. Zhu S C, Guo X L, 2014. Ice crystal habits, distribution and growth process in stratiform clouds with embedded convection in North China: aircraft measurements[J]. *Acta Meteor Sin*, 72(2): 366-389 (in Chinese).
- Aufm Kampe H J, Weickmann H K, Kelly J J, 1951. The influence of temperature on the shape of ice crystals growing at water saturation[J]. *J Atmos Sci*, 8(3): 168-174.
- Gallagher M W, Connolly P J, Whiteway J, et al, 2005. An overview of the microphysical structure of cirrus clouds observed during EMERALD-1[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 131(607): 1143-1169.
- Gowsikhaa D, Abirami S, Baskaran R, 2014. Automated human behavior analysis from surveillance videos: a survey[J]. *Artif Intell Rev*, 42(4): 747-765.
- Hallett J, Mason B J, 1958. The influence of temperature and supersaturation on the habit of ice crystals grown from the vapour[J]. *Proc Roy Soc London, Series A, Math Phys Sci*, 247(1251): 440-453.
- Holroyd III E W, 1987. Some techniques and uses of 2D-C habit classification software for snow particles[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 4(3): 498-511.
- Houghton H G, 1950. A preliminary quantitative analysis of precipitation mechanisms[J]. *J Atmos Sci*, 7(6): 363-369.
- Jakob C, 2010. Accelerating progress in global atmospheric model development through improved parameterizations: challenges, opportunities, and strategies[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 91(7): 869-876.
- Kobayashi T, 1961. The growth of snow crystals at low supersaturation[J]. *Philos Mag: J Theoret Exp Appl Phys*, 6(71): 1363-1370.
- Korolev A V, Emery E F, Strapp J W, et al, 2013. Quantification of the effects of shattering on airborne ice particle measurements[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 30(11): 2527-2553.
- Magono C, Lee C W, 1966. Meteorological classification of natural snow crystals[J]. *J Faculty Sci Hkkaidô Univ Japan Ser*, 2(4): 321-335.
- Mason B J, 1953. The growth of ice crystals in a supercooled water cloud[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 79(339): 104-111.
- McFarquhar G M, Zhang G, Poellot M R, et al, 2007. Ice properties of single-layer stratocumulus during the Mixed-Phase Arctic Cloud Experiment; 1. Observations[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 112(D24): D24201.
- Ono A, 1969. The shape and riming properties of ice crystals in natural clouds[J]. *J Atmos Sci*, 26(1): 138-147.
- Oquab M, Bottou L, Laptev I, et al, 2014. Learning and transferring mid-level image representations using convolutional neural networks[C]//*Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Columbus, OH, USA: IEEE: 1717-1724.
- Paul Lawson R P, Baker B A, Zmarzly P, et al, 2006. Microphysical and optical properties of atmospheric ice crystals at South Pole Station[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 45(11): 1505-1524.
- Pruppacher H R, Klett J D, 1997. *Microphysics of Clouds and Precipitation*[M]. Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers: 27-44.
- Rahman M M, Quincy E A, Jacquot R G, et al, 1981. Feature extraction and selection for pattern recognition of two-dimensional hydrometeor images[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 20(5): 521-535.
- Simonyan K, Zisserman A, 2014. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[J]. *Computer Science*, 1-14.
- Weickmann H K, Aufm Kampe H J, 1950. Preliminary experimental results concerning charge generation in thunderstorms concurrent with the formation of hailstones[J]. *J Atmos Sci*, 7(6): 405-405.
- Wu Z P, Liu S, Zhao D L, et al, 2020. Neural network classification of ice-crystal images observed by an airborne cloud imaging probe[J]. *Atmos Ocean*, 58(5): 303-315.
- Yano J I, Heymsfield A J, Bansemir A, 2018. Determination of the ice particle size distributions using observations as the integrated constraints[J]. *J Atmos Sci*, 75(3): 787-804.
- Yosinski J, Clune J, Bengio Y, et al, 2014. How transferable are features in deep neural networks? [C]//*Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems*. Montreal, Canada: MIT Press: 3320-3328.
- Yu T T, Chandrasekar V, Xiao H, et al, 2020. Characteristics of snow particle size distribution in the Pyeongchang Region of South Korea[J]. *Atmosphere*, 11(10): 1093.
- Zhang Q, Quan J N, Tie X X, et al, 2011. Impact of aerosol particles on cloud formation: aircraft measurements in China[J]. *Atmos Environ*, 45(3): 665-672.
- Zhao P G, Xiao H, Liu J, et al, 2022. Precipitation efficiency of cloud and its influencing factors over the Tibetan Plateau[J]. *Int J Climatol*, 42(1): 416-434.

(本文责编:戴洋)