

雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展. 大气科学, 2008, **32** (4): 967~974

Lei Hengchi, Hong Yanchao, Zhao Zhen, et al. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (4): 967~974

近年来云降水物理和人工影响天气研究进展

雷恒池¹ 洪延超¹ 赵震¹ 肖辉¹ 郭学良²

¹ 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

² 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081

摘 要 回顾和总结了中国科学院大气物理研究所近 5 年 (2003~2007 年) 的云降水物理和人工影响天气研究, 内容涉及云和降水物理研究、云和降水数值模拟研究、人工影响天气研究和云化学研究等诸多领域。随着国家和社会对人工影响天气需求的日益增加, 云降水物理仍是重要的研究方向, 会随着观测和理论研究的发展而取得突破性进展。

关键词 云和降水 飞机观测 人工防雹 数值模拟

文章编号 1006-9895 (2008) 04-0967-08

中图分类号 P426

文献标识码 A

Advances in Cloud and Precipitation Physics and Weather Modification in Recent Years

LEI Hengchi¹, HONG Yanchao¹, ZHAO Zhen¹, XIAO Hui¹, and GUO Xueliang²

¹ Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² Center of Weather Modification, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, during 2003 - 2007 are reviewed and summarized in this paper. The studies of cloud and precipitation physics, cloud and precipitation numerical simulation and cloud chemistry are discussed exactly in scientific viewpoint. Due primarily to the national and society growing demand for weather modification activities, the authors believe that cloud and precipitation physics is still an important research direction and will make breakthrough progress with combination of observation and theoretical research in future years.

Key words cloud and precipitation, aircraft observation, hail suppression, numerical simulation

1 引言

云对大气起着重要的动力和热力作用, 云形成的降水对人类的生命和日常活动具有重要作用和影响。云中潜热释放是大气中各种尺度天气现象的重

要能量来源, 从单块积云到中尺度系统直至全球大气环流, 云的辐射特征很大程度上控制着地球气候并可能影响气候变化。云的潜热释放、成云致雨以及辐射作用都受云内微物理过程影响, 这些过程包括暖云粒子和冰相粒子的形成、增长及其间相互

作用。

作为云和降水物理学重要应用领域的人工影响天气科学活动始于 1946 年美国 Schaefer 和 Vonnegut 发现干冰和碘化银可作为高效的冷云催化剂。我国是世界上气象灾害频发的少数国家之一,气象灾害造成的损失约占所有自然灾害造成经济总损失的 70% 以上,每年由于气象灾害造成的经济损失约占国内生产总值 (GDP) 的 1%~3%,其中,干旱造成的灾害约占气象灾害的 50% 以上。特别是近年来受气候变化等多种原因的影响,部分地区严重旱灾的发生频率明显增加,给农业生产和人民生活等带来了严重影响。同时,我国是世界上冰雹灾害最严重的国家之一,每年冰雹所造成的经济损失约为数亿元至十余亿元,并带来人员伤亡等损失。我国由于水资源短缺,农业、林业、水利等生产发展对于减少干旱、冰雹等灾害的迫切需求,人工影响天气作业规模发展很快,同时促进了云和降水物理学的发展。

近半个世纪,中国科学院大气物理研究所在云雾、降水和人工影响天气研究上取得了一大批成果^[1]。随着国家和社会对人工影响天气需求的日益增加,近年来我国云降水物理研究取得了一系列新的成果^[2]。本文总结了最近 5 年 (2003~2007),中国科学院大气物理研究所在云降水物理和人工影响天气方面的研究进展。具体来说,可以分为以下几个方面。

2 云和降水物理研究

2.1 飞机观测研究

机载粒子测量系统 PMS (Particle Measuring System) 在 20 世纪 70 年代开始投入国际上的一些观测试验,我国于 20 世纪 80 年代初期开始在一些观测试验中使用 PMS 系统。王扬锋等^[3]利用 PMS 资料将延安地区降水性层状云垂直结构划分为 5 个层次,指出过冷水滴和冰晶共存层的冰晶快速增长是发生降水的关键。在 0℃ 层以下,比较深厚的云滴浓度小、含水量较小的暖层会导致地面雨强较小。同时,王扬锋等^[4]发现延安层状云暖层中水凝物粒子的谱分布可以用一种形式的分布密度函数来表示,且拟合结果与观测的谱分布较为一致,拟合谱能表现出谱型特征。齐彦斌等^[5]对东北冷涡中对流云带的飞机穿云观测揭示出云中过冷液态水含量

丰富,最大可达 3.3 g/m^3 。对流云带的上部存在冰粒子高浓度区,这些冰粒子在高过冷水含量区的快速长大对降水产生起到重要作用。云滴直径与云滴浓度在 0℃ 层附近呈现负相关性,上升气流的作用造成了 0℃ 层以下粒子浓度的积累。作者还探讨了冷涡对流云带可能存在的冰晶繁生过程。张佃国等^[6]对北京及周边地区层积云和层状云系飞机探测结果的详细分析表明,小粒子 (云滴、冰晶) 最大浓度的变化范围从 Sc 云的 120 cm^{-3} 到深厚高层云 (As) 的 183 cm^{-3} ,最大含水量变化范围为 $0.42 \sim 0.69 \text{ g/m}^3$ 。作者发现层积云和层状云垂直和水平分布不均匀特性明显: Sc 云系的大粒子不同层的平均谱很相似,为单峰分布; St 云系直径小于 $400 \mu\text{m}$ 的粒子谱型基本相似,而大于 $400 \mu\text{m}$ 的粒子谱分布在 $-8 \sim -12^\circ\text{C}$ 层有明显的双峰分布特征,在 $0 \sim -8^\circ\text{C}$ 却呈现多峰特征。

气溶胶的分布特征对云和降水的形成及辐射和气候变化都具有非常重要的作用,引起人们的广泛关注。张佃国等^[7]2003 年夏秋季机载 PMS 对北京及周边地区不同天气状况下气溶胶粒子的探测结果表明: 气溶胶粒子的分布在不同天气背景时有较大差别,粒子浓度最大值和平均值相差一个量级;在有雾的天气条件下,气溶胶粒子浓度在近地层基本随高度的增加而减小;在阴雨天气情况下,气溶胶粒子浓度和尺度都有增加的现象。作者还发现逆温层底存在明显的气溶胶粒子累积,0℃ 层以下气溶胶粒子呈单峰分布,0℃ 层以上气溶胶出现双峰结构。同时范焘等^[8]分析 2004 年 8、9 月北京及周边地区的气溶胶飞行观测发现气溶胶浓度最大值的量级为 $10^2 \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$,阴天状况下气溶胶浓度最大,晴空时最小,气溶胶粒子浓度谱为单峰分布。

云中液态含水量是极为重要的大气物理参数,而云中过冷水含量在人工影响天气领域特别受关注。为此,中国科学院大气物理研究所与吉林省人工影响天气办公室合作,委托中国科学院长春地理研究所在我国首次研制成功单波段 (9.5 mm) 单天线对空机载微波辐射计。在吉林省野外飞行实验表明,该仪器能够灵敏地测量云中液态水和过冷水含量及其变化,所得数值合理,并与地面雷达回波强度变化有较好的对应关系^[9~11]。金德镇等^[12]利用机载微波辐射计的观测结果揭示了在层状云中嵌入的对流区中有丰富的垂直积分过冷水含量,量级可

达 10^3 g/m^2 , 仪器可以给出水平均匀的层状云液态含水量的垂直廓线, 是一种不可多得的云液水廓线测量工具。梁谷等^[13]发现机载微波辐射计对延安地区层状云的探测结果和 PMS 粒子测量系统的探测结果有较好的一致性, 并且在垂直区域的探测上比 PMS 粒子测量系统更具有代表性^[13]。

2.2 卫星雷达和综合观测

余兴等^[14~16]利用 NOAA-14 卫星观测到在陕西省境内实施 AgI 飞机播云后云顶形成一条清晰的折线云迹, 形状与播云线相似。作者通过催化剂输送扩散的数值模拟, 将模拟结果与卫星云图上云迹进行多方面对比分析证实云迹是播云物理效应在云顶的直观反映, 说明播云物理效应区能响应催化剂的输送扩散状况。两部雷达测得的径向速度再加上质量连续方程可以求解大气风场, 为此何宇翔等^[17]利用模式输出一强风暴过程的三维风场结构, 通过模拟两部多普勒雷达扫描的数据进行三维风场反演。结果表明反演得到的流场和模拟的流场总体趋势完全一致, 风暴的中心位置吻合较好, 上升气流和下沉气流的分布也很接近, 水平速度分量反演的误差很小, 垂直速度的平均离差在各个高度上都较小, 基本上可以反映三维风场的真实情况。樊鹏等^[18]通过对陕西渭北地区各雷达站观测的回波资料和地面降雹资料分析, 得出了适合识别渭北地区冰雹云的 7 个指标, 实际应用结果表明, 识别效果良好, 并可以做到提前识别, 为防雹作业赢得非常宝贵的时间。

刘红燕和雷恒池^[19]根据声雨滴谱仪器测量得到的雨滴谱资料, 分析对流云降水和层状云降水的稳定雨滴谱特征来划分降水云系的种类。结果表明: 层状云的稳定谱中包含有单峰雨滴谱, 而对流云的稳定谱中不包含单峰雨滴谱; 对流云得到的 $Z-R$ 关系的系数比较大, 在 200 以上, 而且数值比较分散; 层状云得到的 $Z-R$ 关系的系数在 200 以内, 数值相对集中。廖菲等^[20]对河南省的大范围春季层状云降水进行的综合加密观测发现降水主要是 700~500 hPa 大气位势不稳定造成的, 位势不稳定区与地面降水极值中心有较好的对应; 在位势不稳定层出现前后, 高空 250~200 hPa 均存在一个急流中心, 而在位势不稳定层的上方或下方则会有风向切变与之对应。廖菲等^[21]同时利用 3 h 一次加密探空资料, 研究了降水发展过程中云与水汽

的背景分布特征。分析结果指出云系的空间分布与等假相当位温面上的准饱和区分布一致, 利用探空资料计算得出的冰面过饱和区和水面过饱和区对于判断云内粒子增长环境更加有用。作者指出当缺乏雷达和卫星等探测数据时, 利用探空资料计算出的各种物理量对于人工影响天气研究和作业具有参考意义。

2.3 理论研究

目前, 云和降水过程参数化数值模式中使用的粒子谱和谱参数不同, 谱参数变化对降水和云中微物理过程的影响值得研究。陶珣和洪延超^[22]利用三维冰雹云模式进行雹云中粒子谱参数变化的数值试验结果表明: 雨滴谱形状参数变化对降雨量和雨滴形成的微物理过程有直接影响; 霰谱的形状参数变化对地面降雹量、降雹强度、雨强的影响较大, 对降雨量影响较小, 对冰晶、霰以及冰雹的质量和数量产生率都有明显的影响, 云中所有微物理过程均受到不同程度的影响; 冰晶谱形的变化对降水量的影响较小, 但对各种粒子的某些微物理过程影响较大, 其对不同地区云或不同个体云降水的影响程度不同。为了拟合实际观测的雨滴谱资料, 通常采用计算不同阶数矩来确定谱分布函数的参数。赵震等^[23]从理论上分析了采用 M-P 分布和 Γ 分布在计算不同阶数矩对应的物理参量时的差别, 发现矩的阶数越高, 这种差别越大。作者发现当粒子直径满足一定条件时, 矩计算的积分截断效应可以忽略。

由于云和降水的发生、发展是大气动力、热力过程与云中微物理过程相结合的产物, 廖菲等^[24]详细阐述了影响云和降水的动力、热力与微物理因素, 讨论了风切变、天气系统抬升、地形动力作用和湍流的作用等因素, 分析了热力扰动、潜热作用、辐射作用, 介绍微物理过程对动力热力过程的影响、带电过程对云降水粒子的影响以及微物理过程对云降水影响的相对重要性。作者指出有必要在研究云和降水问题时, 将动力、热力过程和微物理过程结合起来考虑。由于地形对降水有重要影响作用, 廖菲等^[25]总结了有关地形对降水影响的研究进展, 介绍了地形的动力效应和热力效应, 详细分析了地形的动力、热力效应引起的降水和云物理变化, 重点分析了地形对气候尺度、天气尺度、中尺度及对流性天气系统降水的影响。

3 云和降水数值模拟研究

3.1 中尺度模式研究

赵震等^[26]在 MM5 的 Reisner 2 方案基础上采用双变参数方案新增加一个可选显式方案: 该方案增加了云水、雨水、雪和霰的数浓度预报方程, 粒子引入 Γ 分布谱函数, 将云凝结核 (CCN) 的数浓度采用超几何函数表示, 改进了一些微物理过程的计算。模拟结果表明, 新方案改进了层状云降水模拟效果, 可以为层状云宏观结构特征、降水物理过程和人工影响天气研究提供依据。李书严等^[27]在 LASG-REM 中尺度动力预报模式中加入了较为简单的云雨过程处理方案, 用预报方程对大尺度 (即网格尺度) 的水汽、云水和雨水作显式求解, 对次网格尺度的积云对流进行参数化处理。改进后的 LASG-REM 模式对武汉地区暴雨降水有很好的模拟能力, 能够模拟出空中云水、雨水的分布特征。黄彦彬等^[28, 29]应用 GMS-5 静止气象卫星云图导出的云迹风资料对 REM 中尺度 η 坐标有限区域数值模式的初始风场进行改进处理, 通过对初始场进行控制试验和敏感性试验发现加入云迹风场资料后可以提高模拟精度, 改善因测站稀疏造成的中小尺度系统漏报, 进而提高降水预报精度。

积云并合在积云发展和云复合系统形成中的作用在国际上引起了广泛的兴趣。付丹红和郭学良^[30, 31]使用中尺度非静力平衡模式 (MM5V3) 的模拟结果表明, 积云并合对北京一次强中尺度对流系统 (MCS) 的形成有非常重要作用, 整个形成过程经历了从单体并合、积云团并合和强中心并合的多尺度并合过程。下沉气流对于积云并合有着重要作用, 由强辐散出流形成的上升气流及与环境风相互作用有利于并合的形成和发展。并合过程导致云内上升-下沉气流增强, 对流运动发展加强, 有利于水汽转化, 形成大量过冷云水和冰相粒子, 同时大量冰晶和霰的形成有利于强降水的产生。Guo 等^[32]对城市化后北京地区对流天气的云结构和降水分布进行了中尺度模拟, 模拟的城市化后的降雨强度和分布与实际观测一致。模拟结果表明: 地面粗糙度的增加能加强低空辐合, 从而使高空对流减弱而低空对流加强; 地面降水减少, 尤其在城市化区域更明显, 降水分布在城市化与非城市化交界地区趋于集中和加强。郭学良和付丹红^[33]将中尺度

模式和强风暴冰雹分档模式结合分析北京一次强雷暴、大风天气的形成过程与云物理结构特征可知: 北京地区特有的地形、冷暖气流分布特征对强灾害性风暴的发生、发展和维持具有非常显著的作用, 降水主要是由于霰/雹粒子通过融化层融化形成的, 强下沉气流主要是由霰/冰雹的拖曳、融化以及雨水的蒸发冷却过程形成的负浮力效应产生的, 强下沉气流在地面辐散导致地面瞬时局地灾害性大风。

董剑希等^[34]对北京及其周边地区出现的一次大雾进行了中尺度模拟研究, 模拟的雾出现和消散时间与实况一致。分析指出形成大雾的主要原因是大气层结稳定、水汽充沛、地面的长波辐射冷却, 近地面层微物理过程充分发展和雾顶的强烈辐射降温致使雾在垂直空间上出现爆发性发展, 而太阳短波辐射对雾的减弱消散有着重要影响, 深厚逆温层的维持对雾长时间维持起着决定性作用。康丽莉等^[35]利用 MM5 对江淮流域的梅雨锋暴雨的数值模拟结果显示: MM5 能一定程度再现一些观测的中尺度特征, 对流参数化方案对网格格距的大小比较敏感; 显式云物理方案考虑冰相后可明显改善模式对暴雨的模拟能力, 尤其是采用 Reisner 包含霰的混合相方案的双重嵌套网格对降水量的模拟效果更好。

3.2 云模式研究

付丹红等^[36]用三维强风暴冰雹分档模式对北京一次强对流天气过程的模拟结果表明, 该模式对此次强风暴的生命史、降水分布、降雹的大小等要素做了较好的模拟, 并能够模拟出伴随强风暴过程所产生的强下沉气流和地面强风速切变 (下击暴流)。高空冰雹粒子的拖曳产生的负浮力作用是促发强下沉气流产生的主要原因, 其次是冰雹的融化和雨水蒸发冷却对下沉气流起加速作用。孙凌峰等^[37]使用该模式对发生在武汉的一次引起坠机事件的下击暴流的模拟结果指出, 下击暴流的发生发展与大的天气背景紧密相关, 该下击暴流产生的直接原因是冰雹的重力拖曳作用引起, 其次是冰雹的融化和雨水蒸发的冷却作用, 空中散度和涡度的分布与变化同下击暴流也存在密切的联系。肖辉等^[38]用改进的三维完全弹性强对流云模式发现其对发生在武汉附近的特大暴雨个例具有较好的模拟能力, 本次对流性强降水中雨水的形成主要是暖雨过程, 霰的融化及其在 0°C 层下碰并云水形成雨水

的过程是主要的。模式云在 0°C 层附近存在明显的雷达回波亮带, 亮带中间含有强回波核和及地下挂回波, 其产生主要是由于冰相粒子在 0°C 层融化形成的, 融化的冰相粒子与云滴碰并又加速雨水的产生, 霰粒的融化贡献最大。

层状云系是一种主要的大范围降水云系, 尤其是层状冷云, 是为缓解北方冬春季干旱开展人工增雨的主要作业对象, 准确认识和掌握层状云降水形成机制和演变特征无疑具有重要的现实意义。胡朝霞等^[39]使用机载 PMS 资料、雷达资料以及地面雨强计资料等, 结合一维层状云模式进行了数值模拟, 采用顾震潮^[40]的三层概念模型(把层状云垂直结构分为三层: 第一层为冰晶层, 第二层为过冷水层, 第三层为暖水层)分析了东北地区一次大范围层状云降雨的云结构及降水形成过程。结果表明这个模型基本反映了降水性层状云的结构和降水产生的物理过程: 第一层中冰晶的凝华增长很重要, 也存在冰晶的碰并过程; 第二层中冰晶和雪的增长主要是通过凝华过程, Bergeron 过程作用很大, 但不同时刻 Bergeron 过程的作用程度不同; 第三层中主要有云滴、雨滴和从第二层降下来以后融化的雪和霰。降水的产生中冷云过程作用稍大, 但暖云过程也起重要作用。洪延超和周非非^[41]对河南省冷锋降水性层状云系中“催化-供给”云的微物理结构、降水粒子形成的环节和微物理过程的一维层状云模式模拟结果说明, “催化-供给”云具有显著的分层结构: 云内高层是冰晶, 下层是雪, 接下来是霰和过冷云水组成的冰水混合层, 最下方是云中暖区的液水层。“催化-供给”云体系是重要的人工增雨条件, 云中水汽对雨水形成的贡献与过冷云水几乎相当, 水汽也是人工增雨的重要条件。

4 人工影响天气研究

4.1 雹云物理和人工防雹研究

陈宝君和肖辉^[42]利用三维全弹性冰雹云模式讨论了过冷雨水低含量条件下冰雹形成和增长机制及其碘化银催化效果。结果表明雹胚以霰为主, 霰主要来自冰雪晶与过冷小水滴的碰冻, 其次来自雪的积聚转化, 霰、冻滴和冰雹在形成后主要靠碰并过冷云水增长。人工催化后霰和冻滴的数浓度增大, 对过冷云水的竞争增强, 其平均尺度减小导致转化成雹的数量减少; 冰雹碰冻过冷云水的增长在

催化后也被削弱, 导致冰雹总质量进一步减少。胡朝霞等^[43]对发生在德国南部慕尼黑的一次混合型雹暴数值模拟表明雹云中冰雹胚胎既有冻滴也有霰, 二者在数量上相当。虽然雹云中不存在过冷雨水累积带, 但在主上升气流区周围存在过冷雨水区, 过冷雨水对冰雹的形成起着重要作用。刘术艳等^[44]对北京一次强单体雹暴过程模拟分析发现冰雹粒子主要由冻滴和霰转化形成, 冻滴对冰雹形成的贡献比霰大得多, 冰雹含水量中心的发展演变与冻滴含水量中心的发展演变相一致, 冰雹主要是通过撞冻过冷水过程而进一步长大的。胡朝霞等^[45]用三维冰雹云模式发现青藏高原东部甘肃省玛曲县的冰雹云中冰雹胚胎以霰胚为主, 雹云中存在较弱的过冷雨水累积带, 累积带中的过冷雨水有利于雹块的增长, 但不起主要作用。雹块的增长主要是通过雹撞冻云水, 其次是撞冻雨水增长。利用改进的三维完全弹性冰雹云模式, 胡朝霞等^[46]模拟了陕西省旬邑县冰雹云个例。该例雹云中冰雹胚胎主要是冻滴, 在雹云发展的初期阶段雹云中存在过冷雨水累积带, 并且该处是雹胚产生的主要区域, 雹块的增长主要通过雹与云水的碰并过程增长。旬邑冰雹云中冰雹胚胎以冻滴为主, 绝大多数冰雹云都存在过冷雨水累积带。康凤琴等^[47]用三维冰雹云分档模式对青藏高原东北侧冰雹云模拟研究结果表明, 中尺度水分和动力条件是冰雹形成和增长的重要因素, 微物理过程决定了冰雹云的消亡, 云中冰雹发生、增长的主要区域和云内上升气流配合良好, 是防雹消雹的主要范围。康凤琴等^[48]根据模拟结果发现温度、云中上升气流、水平风速零线和云中各类水成物、各类冰雹质粒的空间分布满足“穴道”理论描述的配置区域是冰雹颗粒含水量的大值范围, 证明了冰雹云中的“穴道”是冰雹形成和增长的有效区域, “穴道”区域也是人工防雹消雹的主要区域。

李兴宇和洪延超^[49]在三维冰雹云催化模式中将人工引入冰晶单独作为预报量处理, 发现改进后的模式催化效果优于原模式, 水汽在碘化银粒子上核化是产生人工冰晶的主要过程, 人工冰晶收集过冷云水增长是其自然冰晶最大的差别, 自动转化是消耗人工冰晶的最重要的物理过程。人工冰晶减雹机制是由于人工冰晶增加使雪、霰和冻滴增加, 转化成冰雹的数量增加, 而冰雹的尺度减少。崔雅

琴等^[50]用人工冰晶单独作为预报量的改进模式模拟了辽宁省一次冰雹云天气过程,发现其对冰雹云具有较可靠的模拟能力。冻滴是该例自然雹云冰雹胚胎的主要来源,在冰雹形成初期进行 AgI 催化防雹效果最好,减雹的主要原因是催化显著减少了云中冻滴向冰雹胚胎的转化总量。人工冰晶对雪花总质量的贡献较小,对雹总质量的贡献有所增大,而对冻滴总质量的贡献较大。周非非等^[51]通过数值试验得出施加人工抑制上升气流的方法在雹云发展早期将使地面降水量增加,尤其是使降雹量显著增加,而在发展阶段后期不会导致地面降水明显增加。当抑制强度足够大且范围较大时,只有在发展到旺盛阶段进行人工抑制才能使降雹量和固态降水总量明显减小。

目前,我国普遍采用高炮和火箭两种催化工具进行人工防雹。李宏宇等^[52]利用三维冰雹云数值催化模式,分别就高炮催化不同的作业时间、催化剂量、作业部位、催化方式等,以及对火箭催化所携带的高效 AgI 焰剂的成核率与火箭在作业过程中以不同的发射距离、发射仰角和当火箭方位角发生偏离后对地面防雹效果的影响进行数值模拟,以期为提高防雹效果提供一些技术参考。肖明静等^[53]用三维对流云模式对北京降雹性对流天气过程进行播撒模拟发现,无论播撒剂为碘化银还是液态 CO₂,在最大过冷水区播撒均比在最大上升气流区播撒效果好。在云体发展成熟之前播撒均可以取得消雹增雨的效果,而在云体发展旺盛或发展后期播撒则会导致雨水减少,降雹增多。周毓荃等^[54]对发生在河南北部地区的一次冰雹过程进行催化试验表明,该例雹云具有含水量累积区,对累积区中心播撒碘化银能够减雹、增雨;而在此中心之下较低的高度作业,或播撒时间选取不当,则有可能增加冰雹。

4.2 人工增雨研究

液态 CO₂ 是一种新型催化剂,金德镇等^[55]观测发现液态 CO₂ 人工引晶后影响区云中的冰晶浓度、雨滴直径对比比区有明显增加,云中过冷水减少。人工引晶影响区的最大回波强度增大,强回波区的面积扩大,降水增加。这与影响区云中降水粒子增多、直径增大是一致的,证实了液态 CO₂ 催化层状云的物理响应。王以琳和雷恒池^[56]在山东冷云人工引晶试验中,在引晶扩散带中观测到过冷液

态水消耗、冰雪晶浓度增加、云粒子谱拓宽的事实。分析表明,这种与背景值存在巨大差异的物理变化是人工引晶的结果。樊鹏等^[57]测定的液态 CO₂ 播出物的相态、粒子形状和尺度谱表明,液态二氧化碳播出物为液、固、气三相共存混合物。播出物中液态、固态粒子存在时间约 10⁰~10¹s,粒子尺度 10⁻¹~10² μm,束流中单位体积质量可达 3.6 g/m³。Guo^[58]用三维云模式比较了碘化银和液态 CO₂ 的催化效果,发现在 -15~-20℃ 范围内两者具有相同的动力效应,而在 0~-5℃ 的最大过冷水含量区液态 CO₂ 播散能产生更强的动力效应。房彬等^[59]提出了一种新的基于聚类浮动对比区历史回归人工增雨效果统计检验方法,该方法提高了对比区和影响区的相关系数,增加了作业区自然降水量估计值的准确性。

层状云系人工增雨潜力的大小是判断是否作业的最为重要的科学依据,洪延超和周非非^[60]利用中尺度模式模拟了层状云系人工增雨潜力有关的要素,从理论上研究了不同要素与降水的关系。获得了新的潜力要素,例如“催化-供给”云结构、降水机制、冰面过饱和水汽量,并提出了定性综合判断云系人工增雨潜力的思路。李宏宇等^[61]模拟出的冷锋降水云系分层、非均匀性结构明显,云系内同时存在较强的冷、暖云过程。低层和中层首先由暖云过程生成大量云水,而高层冰晶出现后不断向雪转化,大量的冰雪晶由高层降落至中高层云水含量区,促使雨水大量产生,云系存在明显的“播种-供给”云降水机制。锋面云系具有很高的增雨潜力。Guo 等^[62]用云模式模拟研究了对流云播撒碘化银的最佳催化方式,结果显示在最大上升气流和过冷水含量区播散能获得最好的增雨效果。孙海燕等^[63]利用模式评估了火箭增雨效果,发现在对流云中适宜的部位进行人工催化作业是有正效果的,在云发展阶段进行催化增雨效果较好。火箭发射仰角对增雨的效果有很大影响,给出了火箭最佳发射仰角的选取原则。王宏等^[64]用三维对流云模式模拟的结果显示,黄河上游河曲地区的对流云具备一定的催化潜力,如果催化时机、部位选择适当,降水总量增加有望达到 30%~50%,催化所产生的动力效果比较显著。敏感性实验表明,催化高度对增雨效果的影响最为显著。对流云早期催化的增雨效果较好,小剂量催化也有可能达到较好的增雨

效果。

5 云化学研究

林长城等^[65]利用福建九仙山和福州市两地监测的 TSP 资料, 对高山、重点城市的 TSP 酸碱特性和酸化缓冲能力进行分析研究。结果表明, 九仙山、福州市的 TSP 均为酸性颗粒物, 是福建省春季酸雨的致酸因子之一, 福州市的 TSP 致酸性能比九仙山弱。福建省酸雨形成原因除了受外来污染源影响外, 局地污染源对降水酸度影响也十分明显。屈玉等^[66]应用三维欧拉污染物输送模式模拟的福建省本省排放源和邻近省份排放源向其输送的硫沉降量结果表明, 福建省接收的硫沉降量有一半以上是周围省份的远距离输送造成的。春季接收的硫沉降量最多, 春夏季主要受福建西边省份的影响, 秋冬季主要受北边省份的影响。造成福建省 SO_2 沉降的主要来源是本省的排放源, 而 SO_4^{2-} 沉降中外来源占很大比例。

6 小结

中国科学院大气物理研究所的云降水物理和人工影响天气研究近年来获得了较快发展, 在飞机观测和仪器研制、云和降水数值模拟和人工增雨实用方法研究等方面处于国内领先地位, 并有一些研究成果得到国际同行的承认和引用。今后的研究中要加强观测, 重视观测和数值模式的结合, 引进卫星、雷达等非常规观测资料改善模式预报效果, 提高对云和降水物理的理论认识和物理理解, 进而指导人工影响天气的科学作业, 使我国的云降水物理和人工影响天气研究再上一个新台阶, 以期更好地满足国家和社会需求。

参考文献 (References)

[1] 黄美元, 沈志来, 洪延超. 半个世纪的云雾、降水和人工影响天气研究进展. 大气科学, 2003, **27** (4): 536~551
[2] Ma Jianzhong, Guo Xueliang, Zhao Chunsheng, et al. Recent progress in cloud physics research in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2007, **24** (6): 1121~1137
[3] 王扬锋, 雷恒池, 樊鹏, 等. 一次延安层状云微物理结构特征及降水机制研究. 高原气象, 2007, **26** (2): 388~395
[4] 王扬锋, 雷恒池, 吴玉霞, 等. 延安层状云暖层中水凝物粒子的谱分布. 南京气象学院学报, 2005, **28** (6): 787~793
[5] 齐彦斌, 郭学良, 金德镇. 一次东北冷涡中对流云带的宏微

物理结构探测研究. 大气科学, 2007, **31** (4): 621~634
[6] 张佃国, 郭学良, 付丹红, 等. 2003 年 8~9 月北京及周边地区云系微物理飞机探测研究. 大气科学, 2007, **31** (4): 596~610
[7] 张佃国, 郭学良, 肖稳安. 北京及周边地区 2003 年夏秋季气溶胶和水滴分布特征. 南京气象学院学报, 2007, **30** (3): 402~410
[8] 范烨, 郭学良, 付丹红, 等. 北京及周边地区 2004 年 8、9 月间大气气溶胶分布特征观测分析. 气候与环境研究, 2007, **12** (1): 49~62
[9] 雷恒池, 金德镇, 魏重, 等. 机载对空微波辐射计及云液态水含量的测量. 科学通报, 2003, **48** (增刊 2): 44~48
[10] 雷恒池, 魏重, 沈志来, 等. 机载微波辐射计测云中液态水含量(I): 仪器和标定. 高原气象, 2003, **22** (6): 551~557
[11] 江芳, 魏重, 雷恒池, 等. 机载微波辐射计测云中液态水含量(II): 反演方法. 高原气象, 2004, **23** (1): 33~39
[12] 金德镇, 雷恒池, 谷淑芳, 等. 机载微波辐射计测云中液态含水量. 气象学报, 2004, **62** (6): 868~874
[13] 梁谷, 雷恒池, 李燕, 等. 机载微波辐射计云中含水量的探测. 高原气象, 2007, **26** (5): 1105~1111
[14] 余兴, 戴进, 雷恒池, 等. NOAA 卫星云图反映播云物理效应. 科学通报, 2005, **50** (1): 77~83
[15] Yu Xing, Dai Jin, Lei Hengchi, et al. Comparison between computer simulation of transport and diffusion of cloud seeding material within stratiform cloud and the NOAA-14 satellite cloud track. *Adv. Atmos. Sci.*, 2005, **22** (1): 133~141
[16] Yu Xing, Dai Jin, Rosenfeld Daniel, et al. Comparison of model-predicted transport and diffusion of seeding material with NOAA satellite-observed seeding track in supercooled layer clouds. *J. Appl. Meteor.*, 2005, **44**: 749~759
[17] 何宇翔, 肖辉, 杜秉玉, 等. 双多普勒雷达反演强风暴三维风场的数值试验. 南京气象学院学报, 2005, **28** (4): 461~467
[18] 樊鹏, 肖辉. 雷达识别渭北地区冰雹云技术研究. 气象, 2005, **31** (7): 16~19
[19] 刘红燕, 雷恒池. 基于地面雨滴谱资料分析层状云和对流云降水的特征. 大气科学, 2006, **30** (4): 693~702
[20] 廖菲, 郑国光, 洪延超, 等. 2002 年河南春季的一次层状云降水特征研究. 南京气象学院学报, 2004, **27** (2): 160~168
[21] 廖菲, 洪延超, 郑国光. 河南省一次冷锋降水过程的水汽分布特征及其增雨潜力. 气候与环境研究, 2007, **12** (4): 553~565
[22] 陶珏, 洪延超. 云中粒子谱形状因子变化对云及降水影响的数值研究. 气象学报, 2007, **65** (2): 221~230
[23] 赵震, 雷恒池, 陈渭民. 两种不同雨滴谱分布的分析. 南京气象学院学报, 2005, **28** (1): 138~143
[24] 廖菲, 洪延超, 郑国光. 影响云和降水的动力、热力与微物理因素的研究概述. 气象, 2006, **32** (11): 3~11
[25] 廖菲, 洪延超, 郑国光. 地形对降水的影响研究概述. 气象科技, 2007, **35** (3): 309~316

- [26] 赵震, 雷恒池, 吴玉霞. MM5 中新显式云物理方案的建立和数值模拟. 大气科学, 2005, **29** (4): 609~619
- [27] 李书严, 肖稳安, 雷恒池. 对 LASG-REM 模式的改进及云雨数值试验. 南京气象学院学报, 2004, **27** (6): 51~58
- [28] 黄彦彬, 雷恒池, 郭学良, 等. 卫星导风资料对 REM 中尺度数值模式的改进研究. 高原气象, 2003, **22** (6): 574~582
- [29] 黄彦彬, 雷恒池, 王振会, 等. 卫星云迹风资料对中尺度数值模式初始风场改进试验. 南京气象学院学报, 2003, **26** (5): 668~676
- [30] Fu Danhong, Guo Xueliang. A cloud-resolving simulation on the role of cumulus merger process in producing heavy precipitation. *Adv. Atmos. Sci.*, 2006, **23** (6): 857~868
- [31] 付丹红, 郭学良. 积云并合在强对流系统形成中的作用. 大气科学, 2007, **31** (4): 635~644
- [32] Guo Xueliang, Fu Danhong, Wang Jing. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City. *Atmos. Res.*, 2006, **82**: 112~126
- [33] 郭学良, 付丹红. 北京一次典型灾害性雹暴、大风的形成过程与云物理特征. 科学通报, 2003, **48** (增刊 2): 65~69
- [34] 董剑希, 雷恒池, 胡朝霞, 等. 北京及其周边地区一次大雾的数值模拟及诊断分析. 气候与环境研究, 2006, **11** (2): 175~184
- [35] 康丽莉, 雷恒池, 肖稳安. 中尺度模式中各种湿物理过程的数值模拟. 南京气象学院学报, 2003, **26** (1): 76~83
- [36] 付丹红, 郭学良, 肖稳安, 等. 北京一次大风和强降水天气过程形成机理的数值模拟. 南京气象学院学报, 2003, **26** (2): 190~200
- [37] 孙凌峰, 郭学良, 孙立潭, 等. 武汉“6·22”空难下击暴流的三维数值模拟研究. 大气科学, 2003, **27** (6): 1077~1092
- [38] 肖辉, 王孝波, 周非非, 等. 强降水云物理过程的三维数值模拟研究. 大气科学, 2004, **28** (3): 385~404
- [39] 胡朝霞, 雷恒池, 郭学良, 等. 降水性层状云系结构和降水过程的观测个例与模拟研究. 大气科学, 2007, **31** (3): 425~439
- [40] 顾震潮. 云雾降水物理基础. 北京: 科学出版社, 1980. 173~177
- [41] 洪延超, 周非非. “催化-供给”云降水形成机理的数值模拟研究. 大气科学, 2005, **29** (6): 885~896
- [42] 陈宝君, 肖辉. 过冷雨水低含量条件下冰雹形成和增长机制及其催化效果的数值模拟. 大气科学, 2007, **31** (2): 273~290
- [43] 胡朝霞, 郭学良, 李宏宇, 等. 慕尼黑一次混合型雹暴的数值模拟与成雹机制. 大气科学, 2007, **31** (5): 973~986
- [44] 刘术艳, 肖辉, 杜秉玉, 等. 北京一次强单体雹暴的三维数值模拟. 大气科学, 2004, **28** (3): 455~470
- [45] 胡朝霞, 齐彦斌, 郭学良, 等. 青藏高原东部冰雹形成机理的数值模拟. 气候与环境研究, 2007, **12** (1): 37~48
- [46] 胡朝霞, 李宏宇, 肖辉, 等. 旬邑冰雹云的数值模拟及累积带特征. 气候与环境研究, 2003, **8** (2): 196~208
- [47] 康凤琴, 张强, 渠永兴, 等. 青藏高原东北侧冰雹微物理过程模拟研究. 高原气象, 2004, **23** (6): 735~742
- [48] 康凤琴, 张强, 马胜萍, 等. 青藏高原东北边缘冰雹形成机理. 高原气象, 2004, **23** (6): 749~757
- [49] 李兴宇, 洪延超. 三维冰雹云数值催化模式改进与个例模拟研究. 气象学报, 2005, **63** (6): 874~888
- [50] 崔雅琴, 肖辉, 王振会, 等. 三维对流云催化数值模式人工冰晶参数化方案的改进与个例模拟试验. 高原气象, 2007, **26** (4): 798~811
- [51] 周非非, 肖辉, 黄美元, 等. 人工抑制上升气流对冰雹云降水影响的数值试验研究. 南京气象学院学报, 2005, **28** (2): 153~162
- [52] 李宏宇, 胡朝霞, 肖辉, 等. 人工防雹实用催化方法数值研究. 大气科学, 2003, **27** (2): 212~222
- [53] 肖明静, 郭学良, 肖稳安. 碘化银、液态 CO₂ 播撒对流云防雹增雨的数值模拟. 南京气象学院学报, 2006, **29** (1): 768~775
- [54] 周毓荃, 陈宝君, 肖辉, 等. 播撒碘化银实施雹云催化的数值试验——个例研究. 大气科学, 2003, **27** (1): 8~22
- [55] 金德镇, 雷恒池, 郑娇恒, 等. 液态 CO₂ 人工引晶后云微物理和降水变化的观测分析. 大气科学, 2007, **31** (1): 99~108
- [56] 王以琳, 雷恒池. 冷云飞机人工引晶检验. 大气科学, 2003, **27** (5): 929~938
- [57] 樊鹏, 余兴, 雷恒池, 等. 液态二氧化碳(LC)播撒装置应用研究. 应用气象学报, 2005, **16** (5): 685~692
- [58] Guo Xueliang, Zheng Guoguang, Jin Dezhen. A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide. *Atmos. Res.*, 2006, **79**: 183~226
- [59] 房彬, 肖辉, 王振会, 等. 聚类分析在人工增雨效果检验中的应用. 南京气象学院学报, 2005, **28** (6): 739~745
- [60] 洪延超, 周非非. 层状云系人工增雨潜力评估研究. 大气科学, 2006, **30** (5): 913~926
- [61] 李宏宇, 王华, 洪延超. 锋面云系降水中的增雨潜力数值研究. 大气科学, 2006, **30** (2): 341~350
- [62] Guo Xueliang, Fu Danhong, Zheng Guoguang. Modeling study on optimal convective cloud seeding in rain augmentation. *J. Korean Meteor. Soc.*, 2007, **43** (3): 273~284
- [63] 孙海燕, 肖辉, 王振会, 等. 对流性云火箭增雨试验效果的数值模式评估. 南京气象学院学报, 2005, **28** (2): 172~179
- [64] 王宏, 雷恒池, 李书严, 等. 黄河上游河曲地区对流云催化增雨的数值模拟研究. 气候与环境研究, 2004, **9** (4): 619~630
- [65] 林长城, 肖辉, 赵卫红, 等. 福建高山、重点城市春季 TSP 对降水酸度的影响. 热带气象学报, 2006, **22** (4): 405~410
- [66] 屈玉, 肖辉, 王振会, 等. 福建省硫沉降量变化的分析与比较. 气候与环境研究, 2006, **11** (2): 185~193