

洪延超, 雷恒池. 2012. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 951–967, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.32.
Hong Yanchao, Lei Hengchi. 2012. Research advance and thinking of the cloud precipitation physics and weather modification [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 951–967.

云降水物理和人工影响天气研究进展和思考

洪延超 雷恒池

中国科学院大气物理研究所云降水物理和强风暴实验室, 北京 100029

摘 要 云降水物理和人工影响天气密不可分, 云降水物理为人工影响天气提供理论基础, 人工影响天气是云降水物理一个重要应用领域。目前我国人工影响天气规模、经费投入已达世界之最, 人工影响天气工程正在建设之中。论文简要回顾了我国云物理研究和人工影响天气的发展过程, 评述研究工作取得的进展, 思考我国人工影响天气在新形势下进一步的发展的问题, 显得尤为重要。

几十年来, 我国开展了一系列云雾降水的外场观测研究和人工影响天气的外场试验研究, 云和降水物理以及人工影响天气的理论和技术研究不断取得进展, 数值云模式和中尺度模式的模拟研究水平有了长足的进步, 在云和降水物理过程和降水机制研究、云的微物理结构、云水资源和人工增雨潜力评估、催化条件预测、催化剂和催化技术等方面取得了显著进展。论文最后指出, 目前的人工影响天气需要加强人工影响天气核心技术研究, 并提出了需要进一步研究的云和降水物理中的有关科学问题。

关键词 云降水物理 人工影响天气 回顾 思考

文章编号 1006–9585 (2012) 06–0951–17

中图分类号 P48

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.32

Research Advance and Thinking of the Cloud Precipitation Physics and Weather Modification

HONG Yanchao and LEI Hengchi

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

Abstract Cloud precipitation physics and weather modification are mutually dependent; cloud precipitation physics provides a theoretical basis for weather modification, and weather modification is an important application field of cloud physics. Currently, the weather modification scale and funding in China have reached the world's highest levels, and a project for weather modification is under construction. In this paper, the authors briefly review the progress of research work and think further development of the weather modification in the new situation, which is of great practical significance.

During recent decades, China has conducted field observations of a series of cloud and precipitation, in addition to field testing of weather modification. Research in cloud precipitation physics and weather modification theories and technology have progressed, and simulation research levels for cloud models and meso-scale numerical models have advanced significantly. We have made significant progress in the research of cloud and precipitation physical processes, precipitation mechanisms, cloud microphysical structure, cloud water resources and precipitation enhancement potential evaluation, seed condition prediction, and catalyst technology.

Finally, this paper reports that current weather modification studies should include stronger core technology research of weather modification, and we suggest the need for further study of scientific questions relative to cloud and precipita-

收稿日期 2012–10–25, 2012–11–10 收到修定稿

资助项目 中国科学院创新重要方向项目 KZCX2-YW-Q03-03, 知识创新工程领域前沿项目 ZAP08101, 国家自然科学基金项目 40875002

作者简介 洪延超, 1948 年出生, 研究员, 主要从事云降水学研究。E-mail: hyc@mail.iap.ac.cn

tion physics.

Keywords Cloud and precipitation physics, Weather modification, Review, Think deeply

1 引言

我国的人工影响天气始于 20 世纪 50 年代。1956 年 10 月发布的《气象工作研究 12 年远景规划（草案）》中的第二大专题（大气物理学）的第四项是“云与降水物理过程和人工控制水分状态的试验研究”，主要内容列出了人工降雨、消雾和冰雹等，并建议此项工作由中央气象局负责，有关试验和理论研究由中国科学院负责。自此，我国开拓出一个新的研究领域：云物理和人工影响天气，云物理和人工影响天气研究和试验在中国拉开了序幕。20 世纪 50 和 60 年代，人工影响天气事业在我国刚刚起步，必然十分重视人工影响天气的基础理论研究，于是开展了一系列云雾降水的外场观测研究和人工影响天气的外场试验研究。其中包括云的宏观发展过程、云滴谱的观测研究、飞机人工增雨试验、高山融冰化雪试验、土炮防雹试验和消雾试验等。建立了暖云室和冷云室，开展暖云催化剂、冷云催化剂和冲击波作用等室内实验。筹建了云降水物理实验室，开展人工冰核性能、吸湿性核凝结增长和水滴碰并增长试验研究。我国很多地方开展了地面大气冰核、气溶胶、雹块微结构和同位素观测研究。为了培养人工影响天气专业人员，派学生到苏联进修，举办人工降水和人工消雹培训班和经验交流会。

20 世纪 70 年代，中国科学院大气物理研究所主持在山西昔阳县开展的为期 10 年的冰雹云物理和人工防雹研究，同时研制出雹谱仪、闪电计数器，用多种仪器对冰雹云进行综合探测。首次在国内对冰雹云进行分类，研究不同类型冰雹云的形成环境条件、生命史、演变过程、结构特点和降雹特征，建立了冰雹云概念模型，提出冰雹云的识别方法和预报方法。还开展人工防雹试验，开展爆炸防雹原理研究，证实“炮响雨落”现象。人工防雹有效地减轻了当地的冰雹灾害，发展了我国的雹云物理学，提升了我国人工防雹的技术水平。

20 世纪 80 年代，我国重视云物理和人工影响天气的科学研究。1980 年中央气象局提出人工影响天气要加强科学研究，调整、整顿面上工作，在全

国停止人工影响天气作业，撤销相应机构。为了加强科学研究，我国从美国引进一批飞机探测仪器。开始设立有一定规模的项目，开展人工影响天气的研究。例如中国气象科学院的“北方层状云人工降水试验研究”，在我国北方进行人工增雨资源考察和人工增雨试验。外场试验至 1985 年，飞机飞行区域跨 19 个省区市。通过试验，获得大量云微物理资料，结合其他资料，分析了云系宏观特征和微物理结构以及降水形成过程，建立了云系的概念模型，提出了多项人工增雨作业的物理判据。此外，通过大气物理研究所为期 5 年的“梅雨锋云系的观测研究”，建立了云系的概念模型，对云系的云型分布、雷达回波结构、大气层结、降水等物理特征有了清楚的了解；发现层状云和雷达亮带存在不均匀结构，这改变了人们对层状云的传统认识；研究了暴雨产生的物理机制，提出积层混合云容易产生暴雨的观点；研究提出用雷达预测对流云发展阶段、发展趋势和估测降水的方法，可用于人工增雨作业云体的选择。随着气象雷达在全国各地广泛使用，开展了对流云三维结构、演变过程、强对流天气和灾害预警等研究；同时云和降水的数值模拟研究在我国兴起，由于云数值模式的发展和探测技术水平的提高，开始用探测和数值模拟相结合的方法研究云和降水问题。

20 世纪 90 年代，国家“九五”科技攻关项目支持“人工防雹减灾技术”和“人工增雨农业减灾技术”研究课题，分别由大气物理研究所和中国气象科学研究院主持实施。不但探测水平有了显著提高，研究方法也从单纯的观测分析发展到观测分析、野外试验和数值模拟相结合，将三维冰雹云数值模式用于人工防雹的技术研究。研究提出了识别冰雹云的指标，研究了冰雹形成的物理过程、催化防雹的机制和催化技术。研究建立了人工增雨概念模型和人工增雨综合技术系统。通过 30 多年的科学研究、场外试验、室内实验，我国在云和降水学研究领域已取得一大批理论研究成果，人工影响天气的科技水平有了明显提高，我国已初步形成了有一定科学依据的以飞机、高炮和火箭为主要手段的人工增雨和防雹作业体系。

21 世纪初，处于抗旱防灾、减灾和改善生态

环境的需要,我国人工影响天气呈现快速发展势头,国家也增大了对人工影响天气研究的支持力度,人工影响天气的理论和探测研究得到快速发展。国家分别在 2000 年和 2005 年启动了两个人工增雨方面的研究项目,一个是“十五”科技攻关课题“人工增雨技术与示范”;另一个是“十一五”国家科技支撑计划重点项目“人工增雨关键技术与装备研发”。两个项目由中国气象科学研究院主持。通过项目实施,我国的云和降水的综合探测水平有了一定提高,云和降水物理以及人工影响天气的理论和技术研究取得若干进展,数值云模式和中尺度模式的模拟研究水平有了长足的进步。结合探测分析,野外试验和室内实验,在云和降水物理过程和降水机制研究、云的微物理结构、云水资源和人工增雨潜力评估、催化条件预测、催化剂和催化技术等方面取得了显著进展。

通过半个多世纪的努力,目前我国人工影响天气规模、经费投入已达世界之最;我国的东北、西北人工影响工程也正在建设之中。要使我国成为世界人工影响天气强国,为防止和减轻气象灾害发挥更大作用,回顾我国云物理和人工影响天气研究工作取得的进展,思考我国人工影响天气在新形势下进一步发展的意义很有意义。

2 云降水物理研究

2.1 云中粒子和微物理结构

(1) 粒子谱。20 世纪 60 年代的观测研究揭示了我国南方层状云、浓积云的滴谱、云滴浓度和含水量的一些基本特征。观测发现我国南方层状云中云滴谱宽(章光锟, 1962; 詹丽珊, 1962), 浓积云中云滴谱很宽, 并有第二峰值出现(顾震潮等, 1962a)。此外, 雨层云、层积云中也多次观测到有第二极大的云滴谱, 双峰谱不只在个别瞬时谱上出现, 而且常有一段时间内大量的连续出现, 并有明显的演变规律。出现双峰时, 总是伴随着云滴谱的加宽。双峰谱往往在锋区云中, 在雨强比较大而且变化又剧烈的云中也易出现(洪钟祥和黄美元, 1965)。在平均含水量相同时, 起伏量大者的谱较宽。看来, 微物理量的起伏有利于云滴增长(詹丽珊等, 1965)。

北方层状云的研究(游来光等, 2002)给出了层状云中的云滴谱、冰晶谱和雪谱、融化层中的粒

子谱以及雨滴谱。在云滴谱 Γ 分布拟合式中, $\alpha > 5$ (α 为 Γ 函数阶数) 的个例约占总数的 40%, 而且发现 α 值的大小与所处云中部位有关, 从云底向上, α 值逐渐增大。有关雪质粒谱的垂直演变可区分为饱和型和非饱和型两类, 饱和型对应于枝星状雪晶或雪团, 非饱和型则对应于空间状雪质粒。枝星状雪质粒具有更强的攀附过程, 雪质粒的增长既与环境条件有关也与其自身的形态特征有关。随降水强度增加, 雪质粒谱变宽, 雪质粒的总个数也相应增多, 这与许多观测事实一致。在 $-15 \sim -5$ °C 层内, 降水粒子谱经历迅速变宽 (0 °C 层向上) 和迅速变窄 (0 °C 层向下) 的过程。雨滴谱的基本谱型的斜率主要是由负温层中冷雨过程确定的。降水过程前期具有宽谱特征, 对应于高空暖雪带 (温度高于 -20 °C), 雪晶形态为枝星状; 降水后期对应于高空冷雪带 (温度接近 -30 °C), 雪晶形态为空间状。在催化云作用下的供水云中, 降水粒子谱常为具有第二峰值的宽谱, 其峰值直径随高度下降而明显增大。冷锋窄降雪带为宽谱, 类似于供水云中粒子谱; 冷锋宽降雪带的降雪粒子谱则类似于催化云粒子谱。纯暖云过程作用下的雨滴谱为指数式谱, 有高空冷云带作用下的雨滴谱为宽谱, 且有明显的第二峰值。

观测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(王扬锋等, 2005), 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。

但也有观测表明, 云中雨滴谱并不一定符合人们通常在研究工作中使用的 Marshall-Palmar 分布。如在南岳观测的多数雨滴谱都不符合 Marshall-Palmar 分布。有 2 个或多个极大的雨滴谱(顾震潮等, 1962a; 魏绪林, 1962; 阮忠家, 1962), 在雷阵雨过程中雨强和雨滴谱的变化很大。雷阵雨中雨滴谱的多个极大更是常见, 还曾经观测到直径为 7.3 mm 的特大雨滴。对声雨滴谱仪器测量得到的雨滴谱资料分析表明(刘红燕和雷恒池, 2006), 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。

利用机载粒子测量系统探测资料, 分析了积层混合云中粒子浓度和尺度、液态含水量, 以及小云滴和大云滴谱的垂直分布特征, 云层中小云滴谱型为单峰, 谱宽随高度增加先变窄后变宽, 大云滴谱型在云低层为单峰, 中高层为双峰谱, 谱宽随高度增加先变宽后变窄, 并且没有探测到降水粒子

(张佃国等, 2010)。

(2) 大云滴。大云滴的观测分析结果对人工播撒大云滴催化降雨有指导意义。在上海地区不管是发展旺盛的浓积云, 还是云厚只有 1~2 km 的小积云, 都存在大云滴。暖云中大云滴的存在(浓度达 $\geq 10^2 \text{ m}^{-3}$) 是产生降雨的必要条件, 但不是充分条件。降雨还应有其他条件配合, 如要有合适的云中上升气流、含水量和云厚等。因此, 不管云中实际条件, 一律用人工播撒大云滴催化降雨是有问题的(黄美元等, 1983a)。

(3) 积云微结构模型。模型表明, 浓积云中无论在水平或垂直方向上, 都存在多个含水量或云滴浓度极大值区, 它们与云中的对流泡相对应或密切相关(黄美元, 1963)。

(4) 层状云垂直分层结构。顾震潮早期提出层状云的微物理结构大体上分为 3 个层次(顾震潮, 1980): 冰晶层、过冷水层和暖水层。随着对云探测技术和云降水的数值模拟研究的发展, 这一层状云“三层模型”得到证实并进一步发展(洪延超和周非非, 2005; 周非非, 2005; 胡朝霞等, 2007b; 赵震和雷恒池, 2008)。通过云中观测, 对 3 层中的粒子相态、类型和含水量、浓度等微观参数有了清楚的了解; 研究了各层的粒子产生和增长过程以及降水形成的机制和具体环节。层状云的 3 层模型体现了“催化—供给”云的结构: 冰相层对冰水混合层起催化作用, 是催化云; 而冰水混合层和暖水层为从高层落下的冰相粒子提供增长所需的水分和环境, 是供给云。

利用机载粒子测量系统(PMS)资料分析也可以将延安地区降水性层状云垂直结构划分为 5 个层次(王扬锋等, 2007), 过冷水滴和冰晶共存的冰水混合层中冰晶快速增长是发生降水的关键。在 0 °C 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。

利用观测资料分析和中小尺度模式模拟研究结果(洪延超和李宏宇, 2011)表明: 在云系的不同部位, 云的垂直结构是不同的, 云系中含水量中心有 3 个高度: 高层冰云由冰晶和雪组成, 含水量中心在 300 hPa 高度; 中层云是冰水混合层, 云含水量中心在 600~650 hPa 之间高度; 低层云在 800~900 hPa 之间高度, 完全由液水组成。这些含水量中心的高度大体上与凝结率的极大值的高度对应。在锋面云系不同部位, 3 层云有不同的组合。

2.2 云中粒子增长及降水形成机制

(1) 云滴增长。20 世纪 60 年代初, 提出了云滴增长随机过程理论以及暖云降水微观机制模式, 认为云中湍流以及起伏的规律是暖云降水微观机制中一个极其重要的因子。宏观条件除了通过平均气流场外, 还通过湍流和微观过程紧密的相互制约(周秀骥, 1963, 1964)。计算结果表明, 在云滴浓度、湿度场起伏有利于云滴增长。在云滴起伏增长中起伏场的相关时间是一个很重要的因素, 湍流加速场的相关时间很短, 不能在直接形成雨滴过程中有重要贡献。含水量起伏场的相关时间较长, 可以在形成 30~50 μm 大云滴过程中有重要贡献(温景嵩, 1964)。在暖性薄云中, 在垂直气流有起伏条件下, 云滴通过重力碰并增长, 云厚 1.7 km 的暖云也可以产生降雨(徐华英和顾震潮, 1963)。有云泡结构的对流云中, 云厚只有 1 km 也能产生峰值半径为 0.9 mm 的雨滴, 从而解释了薄云降水的观测事实(徐华英和李桂忱, 1980)。新安江流域积云中云滴群凝结增长过程的数值研究表明, 半径 1.5~2.5 μm 的巨核在形成大云滴中起主要作用, 而较大的巨核起到使大云滴提早出现的作用, 但对平衡态凝结谱影响不大。凝结核浓度过大不利于大云滴的形成。湍流交换和夹卷作用对凝结平衡谱的影响较大(徐华英等, 1983b); 在各种碰并过程对云滴谱展宽的作用中, 以重力碰并作用最为显着。小尺度湍流碰并可以加速大云滴的增长, 电碰并作用不大(肖辉等, 1988)。

(2) 冰晶增长。利用楔形冰面热力扩散云室, 研究不同冰面过饱和度和不同温度条件下冰晶长时间的增長过程(王昂生和 Fukuta, 1984), 完整地取得在低冰面过饱和度时的定量结果, 修改和发展了原有的由温度和过饱和水汽密度确定冰晶增长形态的模式, 指出 Wulf 冰晶增长区, 冰形突变区及低冰面过饱和区冰晶增长的新特点。

(3) 冰雹的形成、增长。实例模拟研究(洪延超等, 2002)指出, 云中存在雹胚及冰雹形成的源区, 作为雹胚的霰和冻滴主要通过撞冻过冷水增长。云中存在丰富的过冷水对冰雹胚胎和冰雹形成、增长都是十分重要的。在“冰晶—过冷水—雹胚—冰雹”这一链环中, 没有过冷水参与很难形成强烈降雹。适量的冰晶、雪和丰富的过冷水的存在(尤其是雹云发展的初期, 过冷雨水的存在), 对冰雹的形成和增长极为有利(洪延超, 1999)。对

发生在德国南部慕尼黑的一次混合型雹暴和北京的超级单体雹暴数值模拟(胡朝霞等, 2007a; 刘术艳等, 2004)结果也表明过冷雨水对冰雹的形成起着重要作用。有的雹云雹胚以霰为主, 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(陈宝君和肖辉, 2007)。

多单体风暴中冰雹存在循环增长机制(Guo et al., 2001)。在较强的冰雹云中除了有主上升气流外, 在其旁边还存在一些次级单体, 冰雹是在主单体与次级单体之间循环而增长的。

对陕西等地冰雹云进行数值模拟说明, 雹云中存在含水量累积带, 累积带的出现, 一般表明冰雹在云中开始形成, 累积带一般可维持 3~7 min, 在此期间, 冰雹迅猛长大。累积带是冰雹生长的主要源区。累积带中的含水量随时间有一定变化, 但一直维持高含水量(一般大于 5 g m^{-3})(周玲等, 2001)。即使有的雹云中不存在累积带, 但存在过冷雨水累积区, 具有过冷水累积区的冰雹云的成雹机制与有累积带的冰雹云相同(胡朝霞等, 2003)。

2.3 云和降水的发展过程

(1) 积云。积云降水发展过程的数值模拟研究表明, 积云的形成和发展是极其迅速的, 一般经 10 min, 云便能发展到几公里厚; 积云发展到一定强度后, 云顶会出现砧状结构, 在云的周围和云顶上, 会建立起比较稳定的下沉气流; 影响积云发展强度的主要参数是层结、相对湿度和云底的环境温度。最大上升气流速度中心, 在积云的发展初期, 位于云的中下部, 以后逐渐上升(周晓平等, 1964)。对流除在不稳定和中性稳定层结条件下可以发展外, 在稳定层结下有时也可以得到发展; 当对流流场的结构合适时, 风速的垂直切变将促使对流发展; 水汽凝结反馈对云层的垂直发展有很强的制约作用; 云中水滴对气流拖带作用对积云发展有重要影响, 可以导致云崩溃, 可以形成阵性降水(巢纪平, 1961; 顾震潮和胡广兴, 1962)。用积云暖雨模式研究了积云形成暖雨的条件(胡志晋, 1979), 计算了积云通过暖雨过程形成降水需要的云厚, 研究了云体升速和积云降水云厚的关系。研究还表明(徐华英等, 1988), 风切变对积云降水有影响, 在一般情况下, 风切变都是不利于积云降水的发展。但是, 在两种情况下中等强度的风切变有利于积云降水的发展: 一是积云移动的前方有高湿区, 二是只在低层有适当强度的风切变, 总降水量可增

加 2~3 倍。

利用模式还研究了冷水面对积云降水发展的影响(孔凡铀等, 1987), 冷水面造成的水陆环流使近水面的积云得到增强, 在移入冷水面后, 发展受到抑制; 冷水面还可以改变对流云的传播路径。地形对移动积云发展有影响(孔凡铀等, 1988), 积云移过孤立山地或移入山区时得到增强, 雨量增大; 而移出山地的积云则被减弱。地形作用在积云发展初期最为明显, 对于移动积云, 以动力抬升作用为主, 对山地上形成的积云以热力作用更为重要。

积云并合对积云发展有影响(黄美元等, 1987), 同时形成的两块云, 只有相距较近时才有相互影响, 若两云的强度相近, 则可能发生并合; 若两云的强度相差较大时, 弱云受到抑制, 而强云得以增强; 非同时形成的云只有在相距较近, 且都处于发展阶段时才相互作用; 并合云比单块云发展强烈, 降水量也大; 云的并合是云下层水平气压场和降水引起的辐合流场共同作用的结果。用考虑了详细微物理过程的一维对流云模式模拟研究了阵雨、冰雹和暴雨云中的微物理过程(胡志晋和何观芳, 1988), 研究认为在云底较暖的积雨云中, 贝吉龙过程对降水作用不大, 而暖雨过程则是启动降水的主要环节。

使用中尺度模式的模拟结果分析表明(付丹红和郭学良, 2007), 积云并合对中尺度对流系统(MCS)的形成有非常重要作用, 下沉气流对于积云并合有着重要作用, 由强辐散流出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。利用反演 FY2C 卫星资料得到的云物理特征参数, 结合雷达、微波辐射计和地面雨量等资料, 综合分析了安徽一次强降水过程的云合并特征(蔡淼等, 2011)的结果表明: 对流云团发展合并是这次强降水发生的主要原因。对流云团合并初期, 云底由小粒子组成, $T\text{-}r_e$ (T 为云顶温度, r_e 为云粒子有效半径)图上表现为深厚的凝结增长区域, 合并时整层云粒子的有效半径增长明显, 粒子相态达到混合相态区和冻结层的温度不断升高; 合并时, 云体上部(云顶)先合并, 一旦云中不均匀的液水合并, 合并部位的云光学厚度迅速增加, 地面微波辐射计

观测的整层液水含量跃增,地面将会出现强降水。

对流风暴中冰相过程的作用有二(孔凡铎等, 1991):一是固体粒子的形成使云中释放更多的潜热,使对流发展更加旺盛;二是较大的冰质粒下落速度使地面降水或强降水提早开始。对流加强也使地面总降水量和雨区范围增大,云下冷空气堆强度和风暴低层出流相应增强。这些作用在一定程度上也影响到诸如云内水平涡旋运动、风暴分裂、云外夹卷、云砧平衡等动力学和形态学特征,特别是在风暴环境相对较冷、过冷层很深厚的情况下,冰相微物理过程对风暴动力结构、移动路径和降水量等有更为突出的作用。对东北冷涡中对流云带的飞机穿云观测揭示出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(齐彦斌等, 2007)。

利用三维冰雹云模式模拟研究了粒子谱参数变化对降水的影响(陶明和洪延超, 2007)。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。

武汉附近特大暴雨个例的数值模拟研究(雷恒池等, 2002;肖辉等, 2004)指出,形成对流性强降水中的雨水主要是暖雨过程,霰的融化及其在 0℃层下碰并云水形成雨水的过程是主要的。特殊的温湿层结配置和近地层高温、高湿水汽输送是强降水长时间维持的能量来源。

(2) 积层混合云。嵌入层状云的对流云和层状云组成的混合云系统是一非常有效的降水系统。层状云给积云提供良好的发展条件,饱和的环境及伴随层状云的辐合场使对流云具有长生命期、产生持续性的高强度降水和间歇型的特高强度降水而冰相微物理过程是产生暴雨的主要微物理机制(黄美元等, 1987;洪延超, 1996)。层状云向积云输送的云水和雨水都有利于积云中降水的发展(洪延超等, 1992)。

积层混合云可以由对流云并合扩大层化形成(李艳伟等, 2009)。对流云给周围的层状云不断输送含水量和能量,支持着层状云的发展,层状云

的上升气流速度得到维持,上升气流面积扩大;对流云的降水量不断减小,而层状云带来了大面积持续时间很长的降水。

(3) 层状云。20 世纪 80 年代初,雷达观测发现层状云及其中亮带的不均匀性(黄美元和洪延超, 1984)。亮带是一条基本水平伸展的强回波区,其中含有一个个回波核,强度可达到 30~40 dBZ,有的回波核带有向下延伸的下挂回波。不均匀亮带可以使层状云产生阵性降水。初步理论计算表明(洪延超等, 1984),亮带上方回波的不均匀性可以直接导致亮带的不均匀性。如果亮带上方存在产生较大尺度和较高浓度冰相粒子的对流泡体,下方与其相对应的亮带强度就高而形成亮带的回波核。除此而外,亮带的不均匀性还与融化粒子和云暖区云滴的碰并增长量、亮带上方冰相粒子的形状、质量、回波不均匀性、亮带中融化粒子的粘并数和含水量的不均匀分布的合理配置有关。其中粘并数和碰并增长量对很不均匀的亮带贡献较大。也就是说,是亮带上方云的微物理结构的不均匀性造成了亮带的不均匀性。根据雷达亮带形成的原理,在亮带上方存在回波的层状云中,如果亮带回波强度较高,冰相过程对云系的降水形成是有重要贡献的。

探测(王扬锋等, 2007)和数值模拟(洪延超和周非非, 2005;胡朝霞等, 2007b)研究表明,对应于层状云或“催化—共给”云的 3 层结构,发生着不同的微物理过程,粒子形成和增长过程也不同。在冰相层,存在冰晶和雪,主要是冰晶。凝华是其主要增长方式,其次是雪与冰晶的聚合过程;冰晶和雪,主要是雪(或聚合体)落入冰水混合层后,继续通过凝华增长或贝吉龙过程增长,同时撞冻过冷云水增长,有部分冰雪晶通过撞冻增长而转变成霰。在下面的液水层,从冰水混合层落下的雪(或聚合体)霰开始融化,同时收集云暖区云水增长,在达到地面之前完全融化成雨滴。此外在这一层形成的雨滴碰并云水增长。

对延安地区降水性层状云系的 PMS 资料分析表明(王扬锋, 2007),贝吉龙过程是发生降水的关键,供给云也起了重要的作用。落入下面的过冷水层的冰晶通过贝吉龙过程不断增大,同时冰晶与冰晶的聚合形成聚合体,雪晶收集冰晶进一步长大,过冷云滴的淞附使部分雪又转化为霰粒;大的冰粒子落入 0℃层以下的暖区融化成为雨滴,碰并

云滴较快增长;落入云的底层的大粒子继续碰并增大,并伴有小云滴的凝结增长。过冷水滴和冰晶共存使冰晶快速增长,可能是发生降水的关键。在 0°C 层高度以下,存在比较深厚的云滴浓度小、含水量较小的小云滴层,是导致地面雨强较小的重要因素之一。

对河南春季层状云的数值模拟研究表明(洪延超和周非非, 2005),雪由冰晶转化过程产生,通过粘并冰晶、撞冻云水和凝华 3 个过程增长。而且,雪粘并冰晶增长主要发生在冰相层;雪撞冻增长发生在冰水混合层,在这一层撞冻云水增长率高于凝华增长率;冰相层和冰水混合层都存在雪的凝华增长。霰主要出现在冰水混合层,是由雪撞冻过冷云水增长后转化形成的。霰主要通过撞冻云水和收集雪过程增长,凝华和收集冰晶的作用较小。雨水存在于“催化—供给”云的液水层。形成雨水主要有 3 个物理过程:碰并云水增长、降落到暖区冰粒子的融化和融化的冰相粒子收集暖区云水转化成雨水。冰粒子的融化对雨水贡献较大;融化的冰相粒子收集暖区云水继续增长对雨水的贡献也不可忽略。作为催化云层的冰相层对降水的贡献约 25.5%,冰水混合层为 31.3%、液水层为 43.1%,亦即供给云对降水的贡献约 74.4%。在冰相物理过程过降水贡献较大的层状云中,水汽和过冷云水对形成降水粒子的贡献相差不大。一次河南产生小到中雨的层状云观测分析(周非非等, 2008)表明,较厚的云体多为混合相结构,冷云过程强于暖云过程,冰粒子凝华增长是其主要增长方式,冰粒子融化对地面降水有较大贡献。

对我国东北地区大范围的层状云降雨的观测和数值模拟研究表明(胡朝霞等, 2007b; 侯团结等, 2011),在层状云的催化层(第一层)中,冰晶的凝华增长很重要,也存在冰晶的碰并过程。在过冷水层(第二层)中,冰晶和雪的增长主要是通过凝华过程,贝吉龙过程作用很大;暖水层(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。雨滴的长大完全靠对云滴的重力碰并,所以暖层的厚度和含水量是决定因素。

我国北方层状云的降水微物理过程基本符合 Bergeron 提出的催化云—供水云相互作用导致降水的总体概念(游来光等, 2002)。催化云与供水云在垂直方向上是分离的,中间常夹有无云区。催化云常为对流层中、高层的高空云带(与冷涌对应的

位势不稳定区中的对流泡区或带)。供水云常为锋下层积云或锋面上稳定抬升的高层云下部云水区。当层状云中内嵌有对流泡体并具有一定伸展厚度时,则可在其单一云体内完成云水向降水的转化过程。降水的垂直向增长表明,冰晶在高层催化云中形成后下落,主要增长于低层的冷云或暖云中,催化云中的降水质量增长常低于总降水量的 30%,供水云中的增长量常大于 70%。供水云的云水向降水转化有赖于催化云的降水强度、催化作用的持续时间;并与催化云的降水微结构特征有关。

对层状云中的冰粒子分析认为(Ye et al., 1991),层状云中主要降水粒子的增长机制是聚合增长,聚合增长开始于较高、较冷的层次,在下落接近融化层时聚合增长越来越明显。模式计算和实测(胡志晋和严采繁, 1987)都得出,厚度为 2 km 的层状暖云可以通过云水—雨水自动转化产生 $0.4\sim 0.8\text{ mm h}^{-1}$ 的降水。

从中尺度数值模式模拟分析结果(李宏宇等, 2006)看出,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层高云水含量区,促使雨大量产生,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。

对一次层状云的模拟分析(杨洁帆等, 2010)表明,冰晶层内冰晶粒子以凝华增长为主,混合层内冰晶粒子凝华增长和淞附过程对冰晶粒子含水量的增长及谱型的拓宽具有同等重要的作用。所不同的是,凝华过程主要发生在混合层中部冰面过饱和度和相对较高的区域,而淞附碰并过程在混合层中下部过冷水含量丰富的区域发生较为迅速。深厚的暖层有利于水滴的碰并增长。冰晶层、混合层和暖层对降水强度的贡献分别为 6.5%、35.5%和 58%。说明混合层和暖层对总雨强的贡献较大,缺乏混合层时地面降水减弱最为明显。

用观测资料分析和中小尺度模式模拟结果(洪延超和李宏宇, 2011)研究表明:锋面云系不同部位降水形成机理是不同的。远离锋区的锋后部位降水几乎完全由冷云过程形成,冰粒子主要通过凝华方式增长,撞冻增长过程很弱,降水完全由冰粒子的融化形成。和锋区相比,锋前区暖云过程对雨水的贡献较大,60%的雨水是由暖云过程产生的;而

锋区附近冷云过程对雨水的形成贡献较大。

3 人工影响天气的理论研究

人工影响天气是云和降水物理学的应用领域,我国人工影响天气的理论以及探测技术研究都取得显著进展,这里只介绍在人工影响天气理论研究成果。

3.1 冰雹云物理和人工防雷研究

1969~1978 年历时 10 年,中国科学院大气物理研究所在山西昔阳县开展了冰雹云和冰雹形成及人工防雷的探测试验研究。1996~2000 年中国科学院大气物理所又在山西旬邑开展了人工防雷减灾技术的研究,不但探测技术水平有明显提高,研究方法也从单纯的观测分析发展到观测分析、野外试验和数值模拟相结合,将中国科学院大气物理研究所研制的三维冰雹云催化数值模式用于人工防雷的理论和技术研究,研究了冰雹形成的微物理过程、催化防雷的机制和催化技术,使冰雹云物理和人工防雷研究取得显著进展。研究成果在全国发挥了指导作用。

(1) 雷达识别冰雹云的方法。对冰雹云雷达回波的形状、尺度、强度、结构、移动和形成等特征进行统计分析后,提出了一个用雷达识别冰雹云的方法,识别正确率约为 85% (杨培才等, 1980; 刘锦丽等, 1983)。对雷雨云和冰雹云的闪电特征的研究发现,冰雹云与雷雨云在闪电频数、闪电峰值区特征方面有明显区别,进而研究闪电频数与雷达回波厚度及降雹之间的关系,在此基础上提出用观测闪电特征识别冰雹云的方法,识别准确率达 80% (王昂生等, 1976)。在陕西旬邑地区,用云顶温度和 45 dBZ 回波顶高作为指标识别冰雹云的方法 (肖辉等, 2002)。

(2) 冰雹云分类及其演变。将我国北方地区雹云分成 4 种类型,即强单体雹云、弱单体雹云、传播雹云和多单体雹云,并给出各类雹云的雷达回波结构、形成各类雹云的高空温湿风场特点、出现概率和降雹灾情分布等 (王昂生等, 1980),提出冰雹云生消演变的 5 个阶段,并特别强调冰雹在云中形成的“跃增”及冰雹生长时的“酝酿”阶段的重要性。

(3) “炮响雨落”现象,提出爆炸影响云中上升气流的设想。在山西昔阳用高炮轰击云时发

现,炮击后 1.5~2.0 min 产生降雨,炮击后雨强明显增大、云滴谱变宽并出现双峰 (徐华英等, 1983a); 还发现云头受炮击后,多数云头下降、消散,有时云泡外形结构出现窟窿。受“炮响雨落”现象的启发,提出爆炸影响云中上升气流的设想,并进行一系列实验研究。认为对于中等强度的对流云,爆炸可以影响云的上升气流,其影响可以维持 2~4 min (徐华英等, 1983c); 爆炸波扰动和减弱了云中上升气流,破坏降水粒子的下落末速与上升气流的平衡,造成“炮响雨落”,“云体减弱、消散”,“降雹减弱”等现象 (黄美元等, 1979)。

通过数值试验得出 (周非非等, 2005) 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雷。

(4) 催化防雷机制。实例模拟研究了云中冰相物理过程,指出云中存在雹胚及冰雹形成的源区,人工防雷的催化部位应在源区。对冰雹催化防雷机制的研究指出,人工防雷的“竞争机制”是存在的,即催化后,由于冰晶的增多,引起雹胚数量增加,平均直径减小,从而向雹转化比例减小,冰雹的总质量、平均直径和数量 (浓度) 也减小,起到减雹和防雷作用 (洪延超, 1999; 陈宝君和肖辉, 2007; 李兴宇和洪延超, 2005)。

(5) 人工防雷技术方法。20 世纪 70 年代在山西昔阳通过 10 年的人工防雷研究,研究提出了一套冰雹预报、雷达监视和识别、高炮作业、对比统计方法说明防雷效果的人工防雷技术方法 (黄美元等, 1983b),走上较为科学的人工防雷之路。这套人工防雷技术方法在国内被广为采用。在陕西旬邑地区,研究提出用云顶温度和 45 dBZ 回波顶高作为指标识别冰雹云的方法,研究了人工防雷的优化作业方法。结果表明,最佳作业部位为冰雹云的强回波中心区。以冰雹形成前 1~2 min 或形成初期进行作业为最佳 (肖辉等, 2002)。另外,还提出了用火箭进行人工防雷作业的指导性方法 (李宏宇等, 2003)。

对陕西冰雹云数值模拟说明,冰雹云中存在含水量累积带。累积带中的含水量随时间有一定变

化,但一直维持高含水量(一般大于 5 g m^{-3}),对累积带进行人工催化可以获得较好的防雹效果(周玲等,2001;周毓荃等,2003;肖明静等,2006)。即使有的雹云中不存在累积带,但存在过冷雨水累积区,具有过冷水累积区的冰雹云的成雹机制与有累积带的冰雹云相同(胡朝霞等,2003)。多参数雷达识别冰雹云的数值模拟研究结果表明,单种雷达虽然提供了一些独特的有用讯息,但对识别冰雹云仍有一定局限性。综合利用多参数雷达讯息可以明显提高识别能力(漆梁波等,2002)。此外,在冰雹形成初期进行 AgI 催化防雹效果最好(崔雅琴等,2007),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。

利用二维完全弹性冰雹云数值模式模拟了几种不同的冰雹云(黄燕和徐华英,1994),分析了不同催化方案下的人工防雹催化效果,指出了防雹的最佳催化方案和适宜催化作业的冰雹云条件。利用三维冰雹云数值催化模式研究了高炮和火箭催化防雹技术(李宏宇等,2003),分别研究了两种催化工具的催化作业时间、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。

3.2 工增雨理论研究

(1) 暖云人工增雨。理论研究结果表明,在对流性暖云人工降水作业中,盐粉的播撒部位和颗粒大小对播撒效率和降水效果有很大影响。它依赖于云的厚度、含水量、上升气流及云生命时间等条件,对于不同的对流云,有不同的播撒高度、剂量和颗粒大小的最佳播撒方法(顾震潮等,1962b)。20 世纪 60 年代,在湖南和广东开展的暖云人工降雨试验没有采用国外的小盐粒、小剂量、云底播撒的作业方法,而是采用在对流性暖云顶顶部反复播撒颗粒很大的盐粒,得到明显的人工降水效果。提出了催化暖云降水的方法和指标,增雨效果为 7%。以后建立了一维盐粉催化积云的数值模式,(胡志晋和蔡利栋,1979),模拟研究了盐粉催化暖积云的效果,其中包括催化可以提高降水机率、使积云初始回波高度降低、催化高度影响增雨效果,催化高度

低的效果较好等;还模拟研究了盐粉对不同为物理特性的击晕的催化。二维模式盐粉催化研究(徐华英和郝京甫,1983)表明,在适合条件下,盐粉催化后约半小时可出现增雨,增雨量为 10%~50%,是播撒量的几千倍。用直径小的盐粉催化增雨效率高,但在云中生长时间长,一般采用几十微米到 $100 \mu\text{m}$ 直径的盐粉为宜。

(2) 人工增温影响积云。数值实验结果表明,人工增温可以影响积云宏观动力过程。人工增温后,云中浮力、上升气流和含水量均增加,加强了云的发展,人工增温强度和范围愈大,影响效果也大;改变云中垂直气流的人工影响效果比改变云中温度的人工影响的结果要复杂。施加下沉气流的影响有时可以产生消云或减弱云发展的作用,有时出现云减弱之后又发展得更旺盛的结果。人工影响积云中垂直气流的后果因大气层结、影响强度、影响时间和云发展状况的不同而不同(徐华英等,1986)。

(3) 人工增雨潜力及其评估。研究表明云中的过冷水含量是人工催化的有利条件,而过冷水含量少的云也具有一定的潜力,人工增雨的水分来源不仅出自于水-冰的转化,还可来自于汽-冰转化(胡志晋等,1983)。固相雨胚的形成过程不仅转化过冷云水,还可转化冰水面饱和水汽密度差($\Delta\rho$),试验为在过冷云水含量低的云中实施人工增雨提供了重要的实验依据(陈万奎和严采繁,2001)。

利用中尺度数值模式模拟的层状云系,研究与人工增雨潜力有关的要素,在分析云体的垂直结构、降水机制、水汽厚度、冰面过饱和水汽量、云水厚度、过冷水含量、冰晶浓度、降水效率(凝结水降水效率和凝华水降水效率)等潜力要素基础上,获得了新的潜力要素,即“催化—供给”云结构、降水机制、冰面过饱和水汽量。提出了定性综合判断云系人工增雨潜力思路(洪延超和周非非,2006)。

(4) 人工催化影响降水机制。提出了新的层状云人工增雨机制(胡志晋,2001),指出人工冰晶除通过贝吉龙过程使过冷云水转化为降水外,还使一部分冰面过饱和水汽转化为降水,凝华潜热的释放导致空气增温和局部升速加大,促进云降水的发展。

液态 CO_2 是一种新型催化剂。测定的液态 CO_2 播出物的相态、粒子形状和尺度谱表明(樊鹏等,2005),液态 CO_2 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 $10^0 \sim 10^1$ s, 粒子尺度 $10^{-1} \sim 10^2 \mu\text{m}$, 束流中单位体积质量可达 3.6 g m^{-3} 。

研究了液态 CO_2 催化增雨机制(金德镇等, 2007), 观测发现人工引晶后影响区云中的冰晶浓度、雨滴直径对比区有明显增加, 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 CO_2 催化层状云的物理响应。在山东冷云人工引晶试验(王以琳和雷恒池, 2003)中, 观测到引晶扩散带中过冷液态水消耗、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。

用三维云模式比较了碘化银和液态 CO_2 的催化效果(Guo et al., 2006), 发现在 $-20 \sim -15^\circ\text{C}$ 范围内两者具有相同的动力效应, 而在 $-5 \sim 0^\circ\text{C}$ 的最大过冷水含量区液态 CO_2 播散能产生更强的动力效应。

对华南一例冷锋降水云系用工冰晶催化(史月琴等, 2008)使地面雨量在催化后 30 min 开始增加, 80 min 时达到峰值, 120 min 时减小到最小值; 催化云影响其周围的云团, 造成了催化的下风方域外效应, 使催化效果可以延长到催化后 10 h。人工冰晶的引入, 使得大量过冷雨滴快速转变为霰粒, 霰粒通过淞附云水和碰并雨滴过程增长, 使降水提前发展, 之后霰粒的融化使地面雨量增加。大量冻结潜热的释放, 使云中温度增加, 上升速度增强, 说明“静力催化作用”和“动力催化作用”是相互关联不可割裂的。

从人工缓减暴雨的冷云催化数值试验结果看(孙晶等, 2010), 在云体成熟期大剂量持续催化的减雨效果最好。分析表明, 催化增加的大量冰晶碰并过冷雨, 使霰粒子浓度增大而平均尺度减小, 导致霰落速减弱而小于上升运动, 难于下落融化, 造成雨水减小。在周围风速小的弱雨区, 滞留的霰粒长大后仍能下落融化, 引起地面少量增雨。

(5) 人工增雨条件、催化技术和效果评估。通过综合分析了层状冷云人工增雨过程的雷达回波、粒子测量系统探测资料以及 GPS 定位资料(陶树旺等, 2001), 提出探测的云中大粒子浓度作为判别云中可播性的主要技术参量, FSSP100 探测的粒子浓度不小于 20 cm^{-3} 的云区才具有一定的可播性。

其中 2DC 探测的大粒子浓度小于 20 L^{-1} 时, 可确定为强可播区, 否则为可播区。提出的人工增雨条件是(胡志晋, 2001; 王广河等, 2001): 云降水处于发展或持续阶段, 云中有比较深厚的上升气流, 云下蒸发较弱, 云厚较大, 过冷云层较厚, 云底较低; 云中有过冷水, 在较厚的层次里有较大的冰面过饱和和水汽值。同时冰晶浓度较低的更有利。催化部位应在云中过冷水区温度最低处, 播撒剂量能使人工冰晶浓度达到 $20 \sim 100 \text{ L}^{-1}$ 。此外, 用中尺度模式模拟催化试验(Zhao and Lei, 2010)结果表明, 在层状云中 $-5 \sim 15^\circ\text{C}$ 的过冷层用碘化银催化, 由于高空风影响出现较长时间的持续性催化效果, 催化区降水比非催化区降水更大, 并对下风方产生影响。

云模式模拟结果说明, 在对流云中的最大上升气流和过冷水含量区播散碘化银能获得最好的增雨效果(Guo et al., 2007)。用三维对流云模式模拟的结果显示(王宏等, 2004)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 $30\% \sim 50\%$, 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。对一维全分档模式对层状云作碘化银催化试验结果表明(杨洁帆和雷恒池, 2010), 在云体未充分发展阶段催化, 播撒高度对地面降水影响较大; 播撒时间越早, 催化效果越佳。在充分发展的云体内播撒, 过冷水含水量减少, 云内过冷水消耗量与地面雨强增加量之间具有良好的正相关性。催化后云内冰晶粒子凝华速率增加明显, 同时地面雨强增加。AgI 播撒后主要通过增加可降水粒子数量来影响地面降水强度和累计雨量, 而对降水粒子谱型拓宽的贡献有限。

对华南一例冷锋降水云系用工冰晶催化试验表明(史月琴等, 2008)在云体发展早期冷云降水过程还没有启动之前引入人工冰晶的催化效果优于云体发展接近成熟时的催化效果, 而只由催化剂量的不同造成的增雨差异较小。

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被提出(房彬等, 2005), 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。利用模式评估了火箭增雨效果发现(孙海燕等, 2005), 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。

综上所述,通过几十年的努力,我国云物理和人工影响天气的研究取得了一些明显进展,由早期的观测研究发展到观测、实验研究,又进一步发展到探测与数值模拟相结合研究。研究涉及的内容也相当广泛,与人工影响天气相关的云物理研究涵盖云中云微物理结构、云中粒子增长及降水形成机制、云和降水的发展过程等内容;人工影响天气的原理和技术研究主要包括冰雹云物理和人工防雹研究、人工增雨原理和技术研究,研究了冰雹云物理催化防雹和增雨的物理机制、人工催化影响降水和降水的技术方法、人工影响的效果评估方法以及人工增雨的条件、催化技术和潜力评估等。总体上讲,人工影响天气的基础理论研究、原理研究以及技术研究为我国人工影响天气提供发挥了有效的科技支撑作用,这些研究对于人工影响天气来说是不可或缺的。

4 研究思考

需求推动发展,鉴于我国水资源匮乏和旱灾和冰雹灾害不断,从中央到地方各级领导、从国家及研究机构到地方人工影响天气部门都重视人工影响天气事业的发展。目前,人工影响天气的规模空前扩大,而且开始建设人工增雨工程,国家和地方对人工增雨、人工防雹的投入也逐年增加。虽然我国的人工影响天气的基础理论研究、原理研究以及技术研究为人工影响天气提供发挥了有效的科技支撑作用,但还存在一些薄弱环节,人工影响天气的科学技术研究水平远远不能适应预防和减轻气象灾害的需要,更不能满足人工增雨工程建设和使用的需要。因此人工影响天气理论和技术研究急需加强;与此同时,为了人工影响天气事业的可持续发展,也应加强与人影相关的云降水物理的研究。为此,就云降水物理和人工影响天气的研究提出如下意见。

(1) 云降水物理学是人工影响天气的理论基础,人工影响天气是云降水物理的一个应用领域。为了提高人工影响天气的科学性,研究新的人工影响天气的原理和方法,都需要进一步研究云和降水物理中有关的科学问题。

①人工影响增雨的目的是通过加速降水形成过程来增加地面降水,因此我们就必须全面理解自

然降水的形成过程。自然降水是云中微物理过程、热力过程和动力过程相互作用的结果,在相互作用过程中,降水可以通过多种不同的途径形成。其中动力过程集中水汽的能力、上升气流、温度、可以充当凝结核 CCN 和冰核 IN 的气溶胶粒子的特征(包括其形状、化学组分、大小和谱分布等)影响降水的形成过程。但目前人们对云中微物理过程、热力过程和动力过程相互作用的研究和了解还甚少。

②对云和降水系统演变过程的了解是对降水系统人工影响的基础,到目前为止,我们尽管有卫星、雷达、微波辐射计、机载粒子测量系统等设备的探测,对云和降水系统的了解和认识还很肤浅。要开展对云和降水系统综合探测,获取能够充分反映天气系统动力、热力和微物理三维空间的时间演变资料,分析和研究天气系统及降水演变过程,提取影响降水形成的关键要素。

③目前都是使用影响云中微物理过程的方法来达到人工增减雨和防雹的目的。因此对云中产生降水的微物理过程必须有深入的了解,对降水、降水形成的本质过程也需有深刻的认识。这就需要进一步研究云中降水产生的微物理过程、关键环节。此外对于冷云过程而言,冰核在云的过冷区核化形成冰晶,这些冰晶的水汽扩散增长以及增长形成的雪晶的聚并或附凝是冷云降水的基本过程;暖云过程是没有冰相参与的降水形成过程,丰富的液态含水量和较宽的云滴谱是启动降水产生的碰并过程发生的条件。可见就云中粒子而言,冰晶和大云滴是启动冷云和暖云降水形成过程中的关键粒子,要进一步分析形成冰晶的冰核和对形成启动碰并过程的大云滴的凝结核的化学组分和来源。

④冰雹常常是由中尺度对流系统中的对流单体产生的,要研究中尺度对流系统对其中降水单体的发展的作用,系统中单体之间的相互影响、催化单体与附近未催化单体的相互影响以及这些影响对云中冰雹形成的作用,在这些研究和现有人工防雹催化方法的基础上,提出考虑单体相互影响的中尺度降水系统人工防雹方法和技术。

(2) 充分利用人工增雨工程建设提供的有利条件,加强人工影响天气核心技术研究,为人工增雨工程取得好的效益提供技术保证。做人工增雨,就要对催化作业的云和云系的增雨潜力进行评估,对没有增雨潜力的云或云系催化,既浪费人力物力,还有可能减少自然降水;对有潜力的云系虽然可以

做人工催化, 由于云系不同部位的云物理条件不同, 并不是处处都可以催化作业的, 要选择具有催化条件的部位进行催化, 因此就要研究人工增雨的催化条件; 对符合催化条件的部位做催化, 还讲究催化方法和技术, 所以说催化方法和技术也是需要进一步研究的。还要研究催化效果的评估方法, 只有正确的效果评估才能为改进人工影响天气的技术提供科学依据。这些核心技术研究是相互关联的, 对没有催化条件的云体或没有用正确的技术催化的云体, 做效果评估就没有意义, 或者对盲目催化的云体做效果评估同样没有意义。

(3) 对我国实施人工增雨的地区, 开展人工增雨的云中微物理条件的普查性研究。人类活动的加剧, 使得大气气溶胶浓度有上升的趋势, 在气溶胶浓度增加的背景下, 我国云的微物理结构有没有发生变化, 其溶胶作为凝结核 CCN 和冰核 IN 对云和降水产生何种影响, 云中是否还缺少冰晶? 这些问题对于从事人工影响天的科技人员来说是应该面对和关注的。

5 总结

20 世纪 50 年代, 我国开拓出一个新的研究领域, 云物理和人工影响天气研究和试验在中国拉开了序幕。至此, 我国科技人员开展了一系列云雾降水的外场观测研究和人工影响天气的外场试验研究。比较著名的研究和试验是, 在山西昔阳县开展的为期 10 年的冰雹云物理和人工防雹研究, 20 世纪 80 年代“北方层状云人工降水试验研究”, 国家“九五”科技攻关项目支持的“人工防雹减灾技术”和“人工增雨农业减灾技术”研究, “十五”科技攻关课题“人工增雨技术与示范”和“十一五”国家科技支撑计划重点项目“人工增雨关键技术与装备研发”。通过研究和试验, 云和降水物理以及人工影响天气的理论和技术研究取得明显进展, 数值云模式和中尺度模式的模拟研究水平有了长足的进步, 在云和降水物理过程和降水机制研究、云的微物理结构、云水资源和人工增雨潜力评估、催化条件预测、催化剂和催化技术等方面取得了显著进展。

(1) 云微物理研究云物理是人工影响天气的理论基础, 研究了层状云、浓积云的滴谱、云滴浓度和含水量的一些基本特征。双峰谱是显著特征且受

到关注, 雨滴谱并不一定符合通常在研究工作中使用的 Marshall-Palmar 分布。在浓积云中观测到大云滴对人工播撒大云滴催化降雨有指导意义。暖云中云滴的存在是产生降水的必要条件, 但不是充分条件。

研究了云中粒子增长及降水形成机制, 提出了云滴起伏增长理论; 通过冰晶增长的实验研究, 获得冰形突变区及低冰面过饱和区冰晶增长的新特点; 在冰雹的形成、增长研究中提出了“冰晶—过冷水—雹胚—冰雹”过程链概念, 强调了过冷水在冰雹形成过程中的作用。

研究了积云、层状云和降水的发展过程, 其中包括影响积云发展强度的主要参数、积云合并、风切变和下垫面性质对积云降水的影响; 此外还研究了云中微物理过程对云和降水的影响, 如对流风暴中的冰相影响、粒子谱参数变化对降水的影响、特大暴雨形成的微物理机制以及积层混合云产生暴雨的机制。雷达观测发现层状云及其中亮带的不均匀性。通过探测和数值模拟研究, 构建了层状云 3 层概念模型, 对 3 层中的粒子相态、类型和含水量、浓度等微观参数有了清楚的了解。

(2) 开展了人工防雹和人工增雨研究, 研究了冰雹云分类及其演变、“炮响雨落”现象、人工抑制上升气流的作用、雹云中的累积带, 研究提出了雷达识别冰雹云的方法和人工防雹技术方法, 其中包括集冰雹预报、雷达监视和识别、高炮作业、对比统计方法说明防雹效果的人工防雹技术方法、用云顶温度和 45 dBZ 回波顶高作为指标识别冰雹云的方法和和高炮、火箭进行人工防雹作业的指导性方法。将三维冰雹云催化数值模式用于人工防雹的理论和技术研究, 研究了冰雹形成的微物理过程、催化防雹的机制和催化技术。

研究了暖云人工增雨理论和人工增温对积云的影响以及人工催化影响降水的机制。开展了人工增雨潜力及其评估研究, 提出了定性综合判断云系人工增雨潜力思路; 提出了新的层状云人工增雨机制, 指出过冷水含量少的云也具有一定的潜力, 研究了液态 CO_2 催化增雨机制, 对冷锋降水云系做人工冰晶催化试验, 说明“静力催化作用”和“动力催化作用”是相互关联不可割裂的。对锋面云系进行人工缓减暴雨的冷云催化数值试验。研究了人工增雨条件、催化技术和效果评估, 指出在对流云中的最大上升气流和过冷水含量区播撒碘化银能获

得最好的增雨效果; 黄河上游河曲地区的对流云具备一定的催化潜力, 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; 催化高度和催化时间对增雨效果的影响最为显著; 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。

(3) 需求推动发展, 人工影响天气的空前规模和人工增雨工程建设要求急需加强人工影响天气理论和技术研究, 要充分利用人工增雨工程建设提供的有利条件, 加强人工影响天气核心技术研究, 为人工增雨工程取得好的效益提供技术保证。为了提高人工影响天气的科学性, 研究新的人工影响天气的原理和方法, 需要进一步研究云和降水物理中有关的科学问题。对我国实施人工增雨的地区, 开展人工增雨的云中微物理条件的普查性研究。

参考文献 (References)

- 蔡淼, 周毓荃, 朱彬. 2011. 一次对流云团合并的卫星等综合观测分析 [J]. 大气科学学报, 34 (2): 170–179. Cai Miao, Zhou Yuquan, Zhu Bin. 2011. Comprehensive analysis of satellite and other observations from a convective clouds merging event [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 34 (2): 170–179.
- 巢纪平. 1961. 层结大气中热对流发展的一个非线性分析 [J]. 气象学报, 31 (3): 191–204. Chao Jihping. 1961. On the dynamics of development of thermal convection in a stratified atmosphere [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 31 (3): 191–204.
- 陈宝君, 肖辉. 2007. 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 [J]. 大气科学, 31 (2): 273–290. Cheng Baojun, Xiao Hui. 2007. Numerical simulation of hail formation and growth in a storm with low supercooled rain water content and the effect of AgI seeding on hail suppression [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 273–290.
- 陈万奎, 严采繁. 2001. 冰相雨胚转化水汽密度差的实验研究 [J]. 应用气象学报, 12 (增刊): 23–29. Chen Wankui, Yan Caifan. 2001. The experimental study on the conversion of saturated vapor density deficit in forming ice-phase rain embryo [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (Suppl.): 23–29.
- 崔雅琴, 肖辉, 王振会, 等. 2007. 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 [J]. 高原气象, 26 (4): 798–811. Cui Yaqin, Xiao Hui, Wang Zhenhui, et al. 2007. The improvement of artificial ice crystal parameterization of IAP three-dimensional convective storm model and its application to case study [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (4): 798–811.
- 樊鹏, 余兴, 雷恒池, 等. 2005. 液态二氧化碳 (LC) 播撒装置应用研究 [J]. 应用气象学报, 16 (5): 685–692. Fan Peng, Yu Xin, Lei Hengchi, et al. 2005. The application of a liquid carbon dioxide seeder [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (5): 685–692.
- 房彬, 肖辉, 王振会, 等. 2005. 聚类分析在人工增雨效果检验中的应用 [J]. 南京气象学院学报, 28 (6): 739–745. Fang Bin, Hiao Hui, Wang Zhenghui, et al. 2005. Application of cluster analysis to the statistical assessment of the effect of artificial rain enhancement [J]. Transactions of Atmospheric Science (in Chinese), 28 (6): 739–745.
- 付丹红, 郭学良. 2007. 积云并合在强对流系统形成中的作用 [J]. 大气科学, 31 (4): 635–644. Fu Danhong, Guo Xueliang. 2007. The role of cumulus merger in a severe mesoscale convective system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (4): 635–644.
- 顾震潮, 胡广兴. 1962. 凝结反馈对云层垂直发展影响的一个线性理论 [J]. 气象学报, 32 (1): 64–70. Gu Zhenchao, Hu Guangshing. 1962. A linear theory of the influence of condensation feedback on the development of the cloud [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 32 (1): 64–70.
- 顾震潮, 陈炎涓, 徐乃璋, 等. 1962a. 南岳云雾降水物理观测 (1960 年 3–8 月) 结果的初步分析 [C]//我国云雾降水微物理特征问题. 北京: 科学出版社, 2–22. Gu Zhengchao, Chen Yanjuan, Xu Naizhang, et al. 1962a. Preliminary analysis of clouds precipitation physical observation (1960 March–August) the results in Nanyue [C]// Microphysical Characteristics of Cloud Precipitation in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 2–22.
- 顾震潮, 王尧奇, 温景嵩, 等. 1962b. 对流性暖云人工降水作业中撒药部位与撒药颗粒对撒布效果影响的初步理论研究 [C]//我国云雾降水微物理特征问题. 北京: 科学出版社. Gu Zhengchao, Wang Yaoqi, Wen Jingsong, et al. 1962b. Preliminary theoretical research of influence of seeding position and seeding particles on spreading effects for artificial precipitation of convective warm cloud [C]// Microphysical Characteristics of Cloud Precipitation in China (in Chinese). Beijing: Science Press.
- 顾震潮. 1980. 云雾降水物理基础 [M]. 北京: 科学出版社, 219pp. Gu Zhenchao. 1980. Cloud and Fog Precipitation Physical Basis (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 219pp.
- Guo X L, Huang M Y, Hong Y C, et al. 2001. A study of three-dimensional hail-category hailstorm model. Part I: Model description and the mechanism of hail recirculation growth [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 25 (3): 273–287.
- Guo X T, Zheng G G, Jin D Z. 2006. A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide [J]. Atmospheric Research, 79: 183–226.
- Guo X L, Fu D H, Zheng G G. 2007. Modeling study on optimal convective cloud seeding in rain augmentation [J]. Journal of the Korean Meteorological Society, 43 (3): 273–284.
- 洪延超. 1996. 积层混合云数值模拟研究 (II) 云相互作用及暴雨产生机制 [J]. 气象学报, 54 (6): 661–674. Hong Yanchao. 1996. The numerical simulation study of convective-stratiform mixed cloud. Part (II)—Interaction of clouds and formative mechanism of the heavy rain [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (6): 661–674.
- 洪延超. 1999. 冰雹形成机制和催化防雹机制研究 [J]. 气象学报, 57 (1): 28–44. Hong Yanchao. 1999. Study on mechanism of hail formation and hail suppression with seeding [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (1): 28–44.
- 洪延超, 周非非. 2005. “催化—供给”云降水形成机理的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 29 (6): 885–896. Hong Yanchao, Zhou Feifei. 2005. A numerical simulation study of precipitation formation mechanism of “seeding—feeding” cloud system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sci-

- ences (in Chinese), 29 (6): 885–896.
- 洪延超, 周非非. 2006. 层状云系人工增雨潜力评估研究 [J]. 大气科学, 30 (5): 913–926. Hong Yanchao, Zhou Feifei. 2006. The study of evaluation of potential of artificial precipitation enhancement in stratiform cloud system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 913–926.
- 洪延超, 李宏宇. 2011. 一次锋面层状云云系结构、降水机制及人工增雨条件研究 [J]. 高原气象, 30 (5): 1308–1322. Hong Yanchao, Li Hongyu. 2011. Cloud structure, precipitation mechanism, and artificial enhancement precipitation condition for a frontal stratiform cloud system [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 50 (3): 1308–1323.
- 洪延超, 黄美元, 王首平. 1984. 梅雨云系中亮带带不均匀性的理论探讨 [J]. 大气科学, 8 (2): 197–204. Hong Yanchao, Huang Meiyuan, Wang Shouping. 1984. A theoretical study on inhomogeneity of bright band in Meiyu frontal cloud system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 8 (2): 197–204.
- 洪延超, 王昂生, 黄炎. 1992. 环境对积云及其降水发展的影响 [C]//长江三角洲灾害性天气研究论文集. 北京: 气象出版社, 23–29. Hong Yanchao, Wang Angsheng, Huang Yan. 1992. The influence of environment on development of cumulus and its precipitation (in Chinese) [C]//Proceedings of Researches on Severe Weather in the Yangtse River Delta (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 23–29.
- 洪延超, 肖辉, 李宏宇, 等. 2002. 冰雹云中微物理过程研究 [J]. 大气科学, 2002, 26 (3): 421–432. Hong Yanchao, Xiao Hui, Li Hongyu, et al. 2002. Studies on microphysical processes in hail cloud [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (3): 421–432.
- 洪钟祥, 黄美元. 1965. 南岳云滴谱第二极大及其他特征 [C]//我国云雾降水微物理特征的研究. 北京: 科学出版社, 18–29. Hong Zhongxiang, Huang Meiyuan. 1965. The second Maximum and other features of clouds drop spectrum in Nanyue [C]// Study of Cloud Precipitation Microphysical Characteristics in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 18–29.
- 侯团结, 胡朝霞, 雷恒池. 2011. 吉林一次降水层状云的结构和物理过程研究 [J]. 气象学报, 69 (3): 508–520. Hou Tuanjie, Hu Zhaoxia, Lei Hengchi. 2011. A study of the structure and microphysical processes of a precipitating stratiform cloud in Jilin [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69 (3): 508–520.
- 胡朝霞, 李宏宇, 肖辉, 等. 2003. 旬邑冰雹云的数值模拟和累积带特征 [J]. 气候与环境研究, 8 (2): 196–208. Hu Zhaoxia, Li Hongyu, Xiao Hui, et al. 2003. Numerical simulation of hailstorms and the characteristics of accumulation zone of supercooled raindrops [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (2): 196–208.
- 胡朝霞, 郭学良, 李宏宇, 等. 2007a. 慕尼黑一次混合型雹暴的数值模拟与成雹机制 [J]. 大气科学, 31 (5): 973–986. Hu Zhaoxia, Guo Xueliang, Li Hongyu, et al. 2007a. Numerical simulation of a hybrid-type hailstorm in munich and the mechanism of hail formation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 973–986.
- 胡朝霞, 雷恒池, 郭学良, 等. 2007b. 降水性层状云系结构和降水过程的观测个例与模拟研究 [J]. 大气科学, 31 (3): 425–439. Hu Zhaoxia, Lei Hengchi, Guo Xueliang, et al. 2007b. Studies of the structure of a stratiform cloud and the physical processes of precipitation formation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (3): 425–439.
- 胡志晋. 1979. 积云形成暖雨的条件 [J]. 气象学报, 37 (3): 72–79. Hu Zhijin. 1979. On the conditions warm rain formation in cumulus clouds [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 37 (3): 72–79.
- 胡志晋. 2001. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨 [J]. 应用气象学报, 12 (增刊): 10–13. Hu Zhijin. 2001. Discussion on mechanisms, conditions and methods of precipitation enhancement in stratiform clouds [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (suppl.): 10–13.
- 胡志晋, 蔡利栋. 1979. 积云暖雨过程及其盐粉催化的参数化数值模拟 [J]. 大气科学, 3 (4): 334–342. Hu Zhijin, Cai Lidong. 1979. A parameterized numerical simulation of warm rain and salt-seeding in cumulus clouds [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 3 (4): 334–342.
- 胡志晋, 严采繁. 1987. 层状云微物理过程的数值模拟(二)中纬度气旋云系的微物理过程 [J]. 气象科学研究院院刊, 133–142. Hu Zhijing, Yan Caifan. 1987. The numerical simulation on microphysical processes in stratiform cloud, Part 2: Microphysical processes in cyclonic cloud system in middle latitude [J]. Journal of Academy of Meteorological Science (in Chinese), 133–142.
- 胡志晋, 何观芳. 1988. 积雨中微物理过程的数值模拟 (二) 阵雨、冰雹、暴雨的个例研究 [J]. 气象学报, 46 (1): 28–40. Hu Zhijin, He Guanfang. 1988. Numerical simulation of microprocesses in cumulonimbus cloud. (II) Case studies of shower, hail, and heavy rain [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 46 (1): 28–40.
- 胡志晋, 秦瑜, 王玉彬. 1983. 层状冷云数值模式 [J]. 气象学报, 41 (2): 194–203. Hu Zhijin, Qin Yu, Wang Yubin. 1983. Numerical experimentation for stratiform cold cloud [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 41 (2): 194–203.
- 黄美元. 1963. 积云的微物理结构 [J]. 苏联地球物理学报, 2: 362–376. Huang Meiyuan. 1963. The microphysical structure of cumulus [J]. The Soviet Union Journal of Geophysics (in Russian), 2: 362–376.
- 黄美元, 洪延超. 1984. 在梅雨锋云系内层状云回波结构及其降水的不均匀性 [J]. 气象学报, 42 (1): 23–30. Huang Meiyuan, Hong Yanchao. 1984. The inhomogeneous features of the precipitation and the echo structure of stratiform cloud in Meiyu frontal cloud system [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 42 (1): 23–30.
- 黄美元, 徐华英, 王昂生, 等. 1979. 爆炸影响对流云发展过程的原理研究 [J]. 大气科学, 3 (3): 280–288. Huang Meiyuan, Xu Huaying, Wang Angsheng, et al. 1979. Studies of influence on development of convective clouds by explosion [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 3 (3): 280–288.
- 黄美元, 何珍珠, 沈志来. 1983a. 暖性层积云中云滴分布特征 [J]. 气象学报, 41 (3): 358–364. Huang Meiyuan, He Zhenzhen, Shen Zhilai. 1983a. The distribution of large droplets in the warm stratocumulus cloud [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 41 (3): 358–364.
- 黄美元, 赵瑞华, 亢雪巧. 1983b. 昔阳县人工防雹效果统计分析 [C]//冰雹和人工防雹研究. 北京: 科学出版社, 107–110. Huang Meiyuan, Zhao Ruihua, Kang Xueqiao. 1983b. statistical analysis of hail suppression effect in Xiyang area [C]// The Study of Hail and Hail Suppression (in Chinese). Beijing: Science Press, 107–110.
- 黄美元, 徐华英, 吉武胜. 1987. 积云合并及相互影响的数值模拟研究 [J]. 中国科学 (B 辑), (2): 214–224. Huang Meiyuan, Xu Huaying, Ji Wusheng. 1987. The Numerical simulation study on cumulus merging and

- their interaction [J]. Science China (Ser B) (in Chinese), (2): 214–224.
- 黄燕, 徐华英. 1994. 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验 [J]. 大气科学, 18 (5): 612–621. Huang Yan, Xu Huaying. 1994. Numerical experiments on hail suppression by AgI seeding [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 18 (5): 612–621.
- 金德镇, 雷恒池, 郑娇恒, 等. 2007. 液态 CO₂ 人工引晶后云微物理和降水变化的观测分析 [J]. 大气科学, 31 (1): 99–108. Jin Dezhen, Lei Hengchi, Zheng Jiaoheng, et al. 2007. Observation research on cloud microphysics and precipitation affection of stratiform cloud seeding by liquid carbon dioxide [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (1): 99–108.
- 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 1987. 冷水面对积云的影响—数值试验 [J]. 大气科学, 11 (2): 160–166. Kong Fanyou, Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1987. The effects of cold water surface on warm cumulus cloud-numerical experiment [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 11 (2): 160–166.
- 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 1988. 山地对积云的影响数值模拟 [J]. 南京气象学院学报, 11 (2): 144–151. Kong Fanyou, Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1988. Numerical Modeling of the effects of mountains on warm cumulus [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 11 (2): 144–151.
- 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 1991. 冰相过程在积云发展中的作用的三维数值模拟研究 [J]. 中国科学 (B 辑), 15 (6): 78–88. Kong Fanyou, Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1991. The 3-D numerical simulation study on effect of ice phase processes in convective cloud in cumulus developing [J]. Science China (Ser B) (in Chinese), (2): 214–224.
- 雷恒池, 王宏, 胡朝霞, 等. 2002. 1998 年 7 月 21 日武汉暴雨小尺度动力特征的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 26 (5): 647–662. Lei Hengchi, Wang Hong, Hu Zhaoxia, et al. 2002. A numerical research on rain storm kinetic process of the Wuhan area on July 21, 1998 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (5): 647–662.
- 李宏宇, 王华, 洪延超. 2006. 锋面云系降水中的增雨潜力数值研究 [J]. 大气科学, 30 (2): 341–350. Li Hongyu, Wang Hua, Hong Yanchao. 2006. A numerical study of precipitation enhancement potential in frontal cloud system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (2): 341–350.
- 李宏宇, 胡朝霞, 肖辉, 等. 2003. 人工防雹实用催化方法数值研究 [J]. 大气科学, 27 (2): 212–222. Li Hongyu, Hu Zhaoxia, Xiao Hui, et al. 2003. Numerical studies of the practical seeding methods in hail suppression [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (2): 212–222.
- 李兴宇, 洪延超. 2005. 三维冰雹云数值催化模式改进与个例模拟研究 [J]. 气象学报, 63 (6): 874–888. Li Xinyu, Hong Yanchao. 2005. The improvement of 3D hail cloud model and case simulation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (6): 874–888.
- 李艳伟, 牛生杰, 罗宁, 等. 2009. 积云合并扩展层化型积层混合云的数值模拟分析 [J]. 地球物理学报, 52 (5): 1165–1175. Li Yanwei, Niu Shengjie, Luo Ning, et al. 2009. Numerical simulation about mixture of convective and stratiform clouds formed by convection merger [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 52 (5): 1165–1175.
- 刘红燕, 雷恒池. 2006. 基于地面雨滴谱资料分析层状云和对流云降水的特征 [J]. 大气科学, 30 (4): 693–702. Liu Hongyan, Lei Hengchi. 2006. Characteristics of rain from stratiform versus convective cloud based on the surface raindrop data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (4): 693–702.
- 刘锦丽, 郭裕福, 杨培才. 1983. 冰雹云雷达回波的统计特征 [C]// 冰雹和人工防雹研究. 北京: 科学出版社, 52–59. Liu Jinli, Guo Yufu, Yang Peicai. 1983. The statistical characteristic of Hail cloud radar echo [C]// The Study of Hail and Hail Suppression (in Chinese). Beijing: Science Press, 52–59.
- 刘术艳, 肖辉, 杜秉玉, 等. 2004. 北京一次强单体雹暴的三维数值模拟 [J]. 大气科学, 28 (3): 455–470. Liu Shuyan, Xiao Hui, Du Bingyu, et al. 2004. Three-dimensional numerical simulation of a strong convective storm in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (3): 455–470.
- 漆梁波, 黄美元, 肖辉, 等. 2002. 多波长雷达识别冰雹的数值研究 [J]. 大气科学, 26 (1): 30–40. Qi Liangbo, Huang Meiyuan, Xiao Hui, et al. 2002. A numerical study of hail identification using multi-wavelength radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (1): 30–40.
- 齐彦斌, 郭学良, 金德镇. 2007. 一次东北冷涡中对流云带的宏微物理结构探测研究 [J]. 大气科学, 31 (4): 621–634. Qi Yanbin, Guo Xueliang, Jin Dezhen. 2007. An observational study of macro/microphysical structures of convective rainbands of a cold vortex over northeast china [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (4): 621–634.
- 阮忠家. 1962. 南岳阵雨雨滴谱连续取样观测(1961 年 8 月)结果的初步分析 [C]// 我国云雾降水微物理特征问题. 北京: 科学出版社, 58–63.
- Ruan Zhongjia. 1962. Preliminary analysis of the results about shower raindrop spectrum continuous sampling observation (August 1961) in Nanyue [C]// Microphysical Characteristics of Cloud Precipitation (in Chinese). Beijing: Science Press.
- 史月琴, 楼小凤, 邓雪娇, 等. 2008. 华南冷锋云系的人工引晶催化数值试验 [J]. 大气科学, 32 (6): 1256–1275. Shi Yueqin, Lou Xiaofeng, Deng Xuejiao, et al. 2008. Seeding numerical experiments of cold front clouds in south China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (6): 1256–1275.
- 孙海燕, 肖辉, 王振会, 等. 2005. 对流性云火箭增雨试验效果的数值模式评估 [J]. 南京气象学院学报, 28 (2): 172–179. Sun Haiyan, Xiao Hui, Wang Zhenghui. 2005. Modeling evaluations on effects for convective cloud seeding with AgI-loading rocket to enhance precipitation [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (2): 172–179.
- 孙晶, 史月琴, 楼小凤, 等. 2010. 人工缓减梅雨锋暴雨的数值试验 [J]. 大气科学, 34 (2): 337–350. Sun Jing, Shi Yueqin, Lou Xiaofeng, et al. 2010. Numerical experiments on artificial seeding of decreasing the Meiyu heavy rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 337–350.
- 陶树旺, 刘卫国, 李念童, 等. 2001. 层状冷云人工增雨可播性实时识别技术研究 [J]. 应用气象学报, 12 (增刊): 14–22. Tao Shuwang, Liu Weiguo, Li Niantong, et al. 2001. A study of real-time identification of seed ability of cold stratiform clouds [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 12 (suppl.): 14–22.
- 陶玥, 洪延超. 2007. 云中粒子谱形状因子变化对云及降水影响的数值研究 [J]. 气象学报, 65 (2): 221–230. Tao Yue, Hong Yanchao. 2007. Numerical simulation of influence of drop size distribution shape on cloud and precipitation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (2):

- 221-230.
- 魏绪林. 1962. 南岳雨滴谱观测 (1960 年 7 月-1961 年 8 月) 结果的初步分析 [C]// 我国云雾降水微物理特征问题. 北京: 科学出版社, 51-57.
- Wei Xulin. 1962. Preliminary analysis of the results about shower raindrop spectrum observation (August 1961) in Nanyue [C]// Microphysical Characteristics of Cloud Precipitation(in Chinese). Beijing: Science Press, 51-57.
- 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 Angsheng, Fukuta N. 1984. The quantitative studies on the growth law of ice crystal [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 8 (3): 242-251.
- 王昂生, 黄美元, 王学宽, 等. 1976. 防雹时识别雷雨云的闪电观测 [J]. 科学通报, 21 (12): 546-549.
- Wang Angsheng, Huang Meiyuan, Wang Xuekuan, et al. 1967. Lightning observation for identification thunder-rain cloud in hail suppression [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 21 (12): 546-549.
- 王昂生, 黄美元, 徐乃彰, 等. 1980. 冰雹云物理发展过程的一些研究 [J]. 气象学报, 38 (1): 64-72.
- Wang Angsheng, Huang Meiyuan, Xu Naizhang, et al. 1980. Some research on the development of hail-cloud [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 38 (1): 64-72.
- 王宏, 雷恒池, 李书严, 等. 2004. 黄河上游河曲地区对流云催化增雨的数值模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 2004, 9 (4): 619-630.
- Wang Hong, Lei Hengchi, Li Shuyan, et al. 2004. The seeding experiments of severe convective clouds occurred in the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (4): 619-630.
- 王广河, 胡志晋, 陈万奎. 2001. 人工增雨农业减灾技术研究 [J]. 应用气象学报, 12 (增刊): 1-8.
- Wang Guanghe, Hu Zhijin, Chen Wankui. 2001. Study of techniques for precipitation enhancement and agricultural damage mitigation [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 12 (suppl.): 1-8.
- 王扬锋, 雷恒池, 吴玉霞, 等. 2005. 延安层状云暖层中水凝物粒子的谱分布 [J]. 南京气象学院学报, 28 (6): 787-793.
- Wang Yangfeng, Lei Hengchi, Wu Yuxia, et al. 2005. Size distributions of the water drops in the warm layer of stratiform clouds in Yan'an [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (6): 787-793.
- 王扬锋, 雷恒池, 樊鹏, 等. 2007. 一次延安层状云微物理结构特征及降水机制研究 [J]. 高原气象, 26 (2): 388-395.
- Wang Yangfeng, Lei Hengchi, Fan Peng, et al. 2007. Analyses on microphysical characteristic and precipitation mechanism on stratiform cloud in Yanan [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (2): 388-395.
- 王以琳, 雷恒池. 2003. 冷云飞机人工引晶检验 [J]. 大气科学, 27 (5): 929-938.
- Wang Yilin, Lei Hengchi. 2003. Test of cold cloud seeding [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (5): 929-938.
- 温景嵩. 1964. 起伏场的相关时间对水滴随机长大的作用 [J]. 气象学报, 34 (3): 369-377.
- Wen Jingsong. 1964. The effect of relative time for fluctuation field on random grow up of droplets [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 34 (3): 369-377.
- 肖辉, 徐华英, 黄美元. 1988. 积云中雨滴谱形成的数值模拟研究, II. 各种碰并过程、大气层结等的作用 [J]. 大气科学, 12 (3): 312-319.
- Xiao Hui, Xu Huaying, Huang Meiyuan. 1988. A study of numerical simulation on the formation of the cloud droplet spectra in cumulus clouds-Part II: The roles of various collision processes, atmospheric stratifications and miscellaneous [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 12 (3): 312-319.
- 肖辉, 吴玉霞, 胡朝霞, 等. 2002. 旬邑地区冰雹云的早期识别及数值模拟 [J]. 高原气象, 21 (2): 159-166.
- Xiao Hui, Wu Yuxia, Hu Zhaoxia, et al. 2002. Earlier identification and numerical simulation of hail storms occurring in Xunyi region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (2): 159-166.
- 肖辉, 王孝波, 周非非, 等. 2004. 强降水云物理过程的三维数值模拟研究 [J]. 大气科学, 28 (3): 385-404.
- Xiao Hui, Wang Xiaobo, Zhou Feifei, et al. 2004. A Three-dimensional numerical simulation on microphysical processes of torrential rainstorms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (3): 385-404.
- 肖明静, 郭学良, 肖稳安. 2006. 碘化银、液态 CO₂ 播撒对流云防雹增雨的数值模拟 [J]. 南京气象学院学报, 29 (1): 48-55.
- Xiao Mingjing, Guo Xueliang, Xiao Wenan. 2006. Numerical modeling study on hail suppression and rain enhancement by seeding convective clouds with silver iodide and liquid carbon dioxide [J]. Transaction of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (1): 48-55.
- 徐华英 顾震潮. 1963. 起伏条件下重力碰并造成的暖性薄云降水 [J]. 气象学报, 33 (1): 108-114.
- Xu Huaying, Gu Chenchao. 1963. On the formation of the precipitation element in a shallow warm-cloud [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 33 (1): 108-114.
- 徐华英 李桂忱. 1980. 有云泡结构的对流云中降水形成的研究 [J]. 气象学报, 38 (3): 260-268.
- Xu Huaying, Li Guichen. 1980. A study on the formation of the precipitation in convective cloud with cell structure [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 38 (3): 260-268.
- 徐华英, 郝京甫. 1983. 盐粉催化积云降水的数值模拟 [J]. 大气科学, 7 (4): 403-410.
- Xu Huaying, Hao Jingfu. 1983. Numerical simulation of cloud seeding with salt particles in cumulus clouds [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 7 (4): 403-410.
- 徐华英, 何珍珍, 陈英仪. 1983a. 炮击和雷电对降水的影响 [C]// 冰雹和人工防雹研究. 北京: 科学出版社, 96-106.
- Xu Huaying, He Zhenzhen, Chen Yingyi. 1983a. The influence of bombardment and lightning on precipitation [C]// The Study of Hail and Hail Suppression (in Chinese). Beijing: Science Press, 96-106.
- 徐华英 黄培强 黄美元, 等. 1983b. 积云中云滴群凝结增长的数值模拟 [J]. 大气科学, 7 (3): 249-259.
- Xu Huaying, Huang Peiqiang, Huang Meiyuan, et al. 1983b. A study on the growth of cloud droplets by condensation in cumulus clouds[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 7 (3): 249-259.
- 徐华英, 何珍珍, 陈章昭, 等. 1983c. 爆炸影响上升气流的模拟实验[C]// 冰雹和人工防雹研究, 84-95. 北京: 科学出版社.
- Xu Huaying, He Zhenzhen, Chen ZhangZhao, et al. 1983c. Simulation experiment for impact of explosion on the updraft [C]// The Study of Hail and Hail Suppression (in Chinese). Beijing: Science Press, 84-95.
- 徐华英, 黄美元, 郝京甫. 1986. 人工影响积云宏观动力过程的数值模拟 [C]// 中国南方云物理和人工降水文集, 北京: 气象出版社, 121-124.
- Xu Huaying, Huang Meiyuan, Huao Jingpu. 1986. The numerical simulation on artificial Influence of cumulus macro-dynamical processes [C]// Cloud Physics and Artificial Precipitation Corpus for China Southern. Beijing: Meteorological Press, 121-124.
- 徐华英, 吉武胜, 黄美元. 1988. 风切变对积云发展影响的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 12 (4): 405-411.
- Xu Huaying, Ji Wusheng, Huang Mei-

- yuan. 1988. Numerical simulation of the effects of vertical wind shear on the development of cumulus clouds [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 12 (4): 405–411.
- Ye J D, Fan B F, Cotton W R, et al. 1991. Observational study of microphysics in the stratiform region and transition region of a mid-latitude mesoscale convective complex [J]. Acta Meteorologica Sinica, 5 (5): 527–540.
- 杨洁帆, 雷恒池. 2010. AgI 焰剂对层状云催化的数值模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 15 (6): 705–717. Yang Jiefan, Lei Hengchi. 2010. Simulation of AgI seeding on stratiform cloud with category model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (6): 705–717.
- 杨洁帆, 雷恒池, 胡朝霞. 2010. 一次层状云降水过程微物理机制的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 34 (2): 275–289. Yang Jiefan, Lei Hengchi, Hu Zhaoxia. 2010. Simulation of the stratiform cloud precipitation microphysical mechanism with the numerical model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 275–289.
- 杨培才, 郭裕福, 刘锦丽, 等. 1980. 华北地区降雹回波系统的分类及单体特征 [J]. 大气科学, 4 (3): 230–244. Yang Peicai, Guo Yufu, Liu Jinli, et al. 1980. The classification of hailstorm systems in North China and the characteristics of the cells in the hailstorms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 4 (3): 236–244.
- 游来光, 马培民, 胡志晋. 2002. 北方层状云人工降水试验研究 [J]. 气象科技, 30 (增刊): 19–56. You Laiguang, Ma Peimin, Hu Zhijing. 2002. A study on experiment of artificial precipitation in north China [J]. Meteorological Science Technology (in Chinese), 30 (suppl.): 19–56.
- 詹丽珊. 1962. 南岳大云滴观测资料 (1960 年 10 月–1961 年 5 月) 初步总结 [C]//我国云雾降水微物理特征问题. 北京: 科学出版社, 47–50. Zhan Lishan. 1962. Preliminary summary of observation data for big cloud droplets (October 1960–May 1961) in Nanyue [C]// Microphysical Characteristics of Cloud Precipitation in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 47–50.
- 詹丽珊, 陈万奎, 黄美元. 1965. 南岳和泰山云中微结构起伏资料的初步分析 [C]//我国云雾降水微物理特征的研究. 北京: 科学出版社, 30–40. Zhan Lishan, Chen Wankui, Huang Meiyuan. 1965. Preliminary analysis of microstructure fluctuation in the clouds in Nanyue and Taishan Mountain [C]// Study of Cloud Precipitation Microphysical Characteristics in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 30–40.
- 章光锟. 1962. 南岳云滴谱资料 (1960 年 9 月–1961 年 8 月) 的初步分析 [C]//我国云雾降水微物理特征问题. 北京: 科学出版社, 36–46. Zhang Guangkun. 1962. Preliminary analysis of shower raindrop spectrum (September 1960–August 1961) in Nanyue [C]// Microphysical Characteristics of Cloud Precipitation in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 36–46.
- 赵震, 雷恒池. 2008. 西北地区一次层状云降水云物理结构和云微物理过程的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 32 (2): 323–334. Zhao Zhen, Lei Hengchi. 2008. A numerical simulation of cloud physical structure and microphysical processes associated with stratiform precipitation in Northwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 323–334.
- Zhao Z, Lei H C. 2010. Numerical simulation of seeding extra-area effects of precipitation using a three-dimensional mesoscale model [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 3 (1): 19–24.
- 周玲, 陈宝君, 李子华, 等. 2001. 冰雹云中累积区与冰雹的形成的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 25 (4): 536–550. Zhou Ling, Chen Baojun, Li Zihua, et al. 2001. A numerical Simulation of hailstorm accumulation zone and hail formation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (4): 536–550.
- 周秀骥. 1963. 暖云降水微物理机制的统计理论 [J]. 气象学报, 33 (1): 97–107. Zhou Xiujie. 1963. The statistical theory of microphysical mechanism of warm cloud precipitation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 33 (1): 97–107.
- 周秀骥. 1964. 暖云降水微物理机制的研究 [M]. 北京: 科学出版社, 105pp. Zhou Xiujie. 1964. The Study on Mechanism of Warm Cloud Precipitation (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 105pp.
- 周非非. 2005. 层状云系人工增雨潜力的数值研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文. Zhou Feifei. 2005. The numerical studies on potential of artificial rainfall for stratiform cloud [D]. Ph. D. Thesis (in Chinese), Graduate School of Chinese Academy of Sciences.
- 周非非, 肖辉, 黄美元, 等. 2005. 人工抑制上升气流对冰雹云降水影响的数值试验研究 [J]. 南京气象学院学报, 28 (2): 153–162. Zhou Feifei, Xiao Hui, Huang Meiyuan, et al. 2005. Modeling evaluation of effects of artificial updraft restraints in a strong hailstorm on its precipitation [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (2): 153–162.
- 周非非, 廖菲, 苏爱芳, 等. 2008. 河南省 2002 年秋季一次层状云降水过程的观测研究 [J]. 南京气象学院学报, 31 (4): 483–493. Zhou Feifei, Liao Fei, Su Aifang, et al. 2008. Observational analysis of stratiform cloud precipitation in autumn 2002 in Henan Province [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 31 (4): 483–493.
- 周晓平, 李兴生, 张耀科, 等. 1964. 积云发展问题的数值试验 [J]. 气象学报, 34 (4): 475–485. Zhou Xiaoping, Li Xingshen, Zhang Yaoko, et al. 1964. A numerical experiment of cumulus development [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 34 (4): 475–485.
- 周毓荃, 陈宝君, 肖辉, 等. 2003. 播撒碘化银实施雹云催化的数值试验——一个例研究 [J]. 大气科学, 27 (1): 8–22. Zhou Yuquan, Chen Baojun, Xiao Hui, et al. 2003. A case study of hail suppression by AgI seeding using 3D hailstorm model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (1): 8–22.
- 张佃国, 樊明月, 龚佃利, 等. 2010. 一次降水性积层混合云系的微物理特征分析 [J]. 大气科学学报, 33 (4): 496–503. Zhang Dianguo, Fan Mingyue, Gong Dianli, et al. 2010. An analysis of microphysical characteristics on precipitation cumulus–stratus mixed clouds system [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 33 (4): 496–503.