

半个世纪的云雾、降水和 人工影响天气研究进展

黄美元 沈志来 洪延超

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 回顾和总结了中国科学院大气物理研究所半个世纪的云雾、降水和人工影响天气研究的进展, 内容涉及云和降水物理研究、雷暴探测和雷电物理研究、云动力学研究、云和降水的数值模拟研究、人工影响天气研究、云化学和酸雨的研究等诸多领域, 论述了各研究领域问题的提出、创新思路、研究方法以及研究结果。

关键词: 云和降水; 探测和实验; 人工降水; 人工防雹; 数值模拟

1 引言

自 20 世纪 40 年代末美国发现冷云催化剂——干冰和碘化银以来, 作为云和降水物理学的重要应用领域的人工影响天气研究、野外和室内实验研究以及数值模拟研究久盛不衰, 而这些研究又促进了云雾和降水学的发展。

出于农业发展和抗旱的需要, 1958 年起我国开展云雾和降水学以及人工影响天气研究。中国科学院地球物理研究所气象研究室(中国科学院大气物理研究所前身)组建了一支强大的科技力量, 开展了一系列云雾降水的观测、人工影响天气的野外和室内试验, 如云的宏观发展过程、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。与此同时, 开始建立暖云室和冷云室, 开展暖云催化剂、冷云催化剂和冲击波作用等室内实验。

从 20 世纪 70 年代到 21 世纪初, 中国科学院大气物理研究所(简称大气物理所)又先后开展了冰雹云物理和人工防雹、华东暖云和梅雨云系观测、云和降水的数值模拟、云化学和酸雨、人工增雨理论和技术等研究。

总之, 大气物理所在云、降水物理和降水化学领域研究成果甚多, 主要涉及云雾降水的微观物理、宏观物理、云动力学、云降水过程、冰雹云物理、雷电物理、人工增雨、人工防雹、人工消雾、酸雨、云化学、云雨水酸化过程等方面。

2 云和降水物理研究

2.1 微观物理观测研究

在 20 世纪 50 年代以前, 中国没有开展过云雾降水的微物理观测。20 世纪 60 年

代，大气物理所通过大量的高山、地面和空中云滴谱、含水量和盐核的观测和研究，不仅取得一大批第一手资料，在云微物理学方面也取得一批重要理论研究成果。

(1) 盐核是重要的凝结核，对云和降水有重要影响，了解大气中盐核的数量及其变化规律对于云和降水学的研究具有十分重要的意义。观测分析说明我国空气中作为巨核的盐粒是相当多的，直径大于 $4\sim 10\ \mu\text{m}$ 的巨盐核浓度约为 $1\ \text{L}^{-1}$ ，直径大于 $2\ \mu\text{m}$ 的巨盐核浓度数量级在 $10^1\sim 10^2$ 个 L^{-1} 。一般不缺少作为大云滴的重要来源的巨核。盐核的来源主要是海洋，我国北方的盐碱土壤也是重要源地^[1~4]。

(2) 云滴谱观测研究是云和降水微物理学研究的重要方面。通过研究发现，我国南方层状云中云滴谱比苏联及欧洲层状云的云滴谱宽，最大云滴直径可达 $50\sim 75\ \mu\text{m}$ ，多次出现 $0.3\ \text{g m}^{-3}$ 以上的含水量；层积云中观测到最大含水量为 $1.47\ \text{g m}^{-3}$ 。这充分揭示了我国南方层状云的滴谱、云滴浓度和含水量的一些基本特征^[5~6]。而在我国南方浓积云中云滴谱很宽，直径大于 $50\sim 70\ \mu\text{m}$ 是常见的。其中以浓积云的中部云滴谱最宽，并有第二峰值出现^[1]。此外，雨层云、层积云中也多次观测到第二极大的云滴谱，第一峰值位于直径 $8\ \mu\text{m}$ 附近，第二峰值的位置一般在 $14\sim 30\ \mu\text{m}$ ，以 $20\ \mu\text{m}$ 附近为最多。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，双峰的消失总是伴随云滴谱的变窄，双峰谱出现时大云滴数目增多，小云滴数目减少。双峰谱往往在锋区云中出現，在雨强比较大而且变化又剧烈时的云中也易出現^[7]。谱宽与含水量的起伏有一定关系，锋面天气的层积云或积云性层积云的底部或下部云滴的细致观测分析表明，云中微结构存在起伏，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^[8]。

(3) 提出一个新的积云微结构模型。模型给出浓积云中不同部位的云滴谱，云滴浓度和含水量的空间分布。该模型表明，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，这些高含水量或高云滴浓度区与云中的对流泡相对应或密切相关^[9]。

(4) 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 $1\sim 2\ \text{km}$ 的小积云，都存在大云滴。由此提出一种看法：暖云中大云滴的存在（其浓度达到雨滴浓度，即 $\geq 10^2$ 个 m^{-3} ）是产生降雨的必要条件，但不是充分条件。降雨的最终形成还应有其他条件的配合，例如，要有合适的云中上升气流、含水量和云厚等。因此，不管云中实际大云滴、上升气流、含水量等条件，一律用人工播撒大云滴催化降雨是有问题的^[10]。

(5) 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。如南岳层积云、高层云、高积云的雨滴谱分成四种类型，多数雨滴谱都不符合 Marshall-Palmar 分布。多次观测到有二个或多个极大的雨滴谱^[1,11,12]，在雷阵雨过程中雨强和雨滴谱的变化很大，且有周期性，雨强的增减并非对称，而且常常雨强加大之前，滴谱先加宽。雷阵雨中雨滴谱的多个极大更是常见；雷击后，雨强加大，大雨滴增多。曾经观测到直径为 $7.3\ \text{mm}$ 的特大雨滴等。

2.2 梅雨锋云系的观测研究

(1) 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。锋北区主要为层状云,大气层结多数是稳定的,这里主要是大范围小强度的层状云降水,但由于层状云结构的不均匀性,在连续性降水中带有阵性特点,锋区大气层结大多数为不稳定的、常常是积状云和层状云共存的混合型云和降水,雨强大;暴雨常发生在该区域。锋南区,大气层结很不稳定,对流云发展,常有范围不大的降水^[13]。

(2) 发现层状云存在不均匀结构,这改变了人们对层状云的传统认识。观测分析发现,在梅雨云系内层状云回波结构及降水有不均匀性,主要表现在两方面:一是层状云内“隐藏”着对流云;二是层状云存在不均匀的雷达亮带,云的暖区存在下挂强回波。结构不均匀的层状云降水也是不均匀的。10 min 平均雨强可以达到 $15 \sim 20 \text{ mm h}^{-1}$ 。雨强起伏强度与弱雷雨云差不多。理论分析认为,产生亮带不均匀的原因主要是亮带上方冰相粒子的形状、质量和含水量的不均匀性^[14]。

(3) 中尺度积层混合云系统及其降水的研究。在研究梅雨锋云系中尺度系统雷达回波结构及其与暴雨的关系时发现,梅雨锋云系中尺度回波团一般为混合型回波,而中尺度回波带主要有对流带和混合带两种类型。中尺度系统能够产生高强度降水,多个中尺度系统相继通过一地或中尺度系统与对流回波群的汇集可以造成梅雨期的局地性暴雨和大暴雨。产生暴雨的中尺度系统常具有混合型回波结构,它们降水强度大,对降水的贡献也大^[15]。为了对此进行解释,研究了层状云对其内及云降水的影响,层状云的存在对积云的发展有显著的促进作用,降水量可以加大到几倍至几十倍,从而认为积层混合云云系可能是产生大雨和暴雨的一种重要结构,这与梅雨锋里锋区混合云系常产生暴雨的观测事实相符合^[16,29]。

(4) 对流云发展阶段、发展趋势预测和降水的估测。通过雷达观测,对安徽屯溪地区夏季对流云初期回波与降水之间的关系研究表明:对流云初期回波绝大多数是在暖区生成的,说明暖云过程起重要作用;采用回波从 15 dBZ 经历 7 min 后,回波强度增为 35 dBZ 部分的厚度、回波最大强度、回波顶高度以及回波演变数据,可以定性地估计积云降水的强弱。提出用雷达识别对流云发展阶段和判别发展趋势的方法,可用于人工增雨作业云体的选择^[17]。

2.3 云和降水微物理的理论研究

(1) 云滴增长理论研究。云和降水的理论是云和降水物理学的重要理论之一。大气物理所的科研人员首先研究了云滴增长过程。在分析云雾滴谱形成理论中,建立了包含 14 个方程的云雾方程组,并提出一个非常重要的概念,即研究云滴的增长和降水的形成,应该把云的宏观动力过程与云的微观物理过程结合起来,进行综合研究^[18]。此外,研究了暖云降水微观物理机制的统计理论,提出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^[19,20]。计算云滴浓度有起伏条件下云滴的重力碰并增长,结果表明,在云滴浓度有起伏条件下,浓度为 10 个 cm^{-3} 半径为 $15 \mu\text{m}$ 的大云滴在 50 min 时间内迅速增长成雨滴,云滴的重力碰并增长比平均情况下快得多。湿度场(水汽过饱和密度)有起伏时云滴的凝结增长计算结果表明,经过 2000 s 就可以形成浓度为 100 个 cm^{-3} ,半径为 $10 \sim 15 \mu\text{m}$ 的大云滴。起伏场的相关时间对水滴随机长大的作用研究表明,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^[21]。

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^[22]。进一步的研究说明，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^[23]。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^[24]；云滴谱形成过程受盐核谱浓度及其化学成分、凝结过程、各种碰并过程等的影响。积云顶附近云滴谱具有明显的双峰特征，这与该高度上云内外夹卷作用有关；大陆性积云云滴谱与海洋性积云云滴谱之间的差异，主要是由于两地空气中盐核总浓度不同所致，而不是由于巨核的多少。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著。小尺度湍流碰并可以加速大云滴的增长，电碰并作用不大^[25]。

(2) 冰晶过程研究。对流风暴中冰相过程的作用研究表明，这种作用有两方面：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、云砧平衍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^[26]。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生长过程，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^[27]。

(3) 机尾云形成条件等的实验研究。将冰箱改造为冷云室进行实验和理论计算。实验表明，温度截止 -60°C 以上，机尾云的形成过程是从水汽到冰晶的相变，是凝结—冻结过程，而不是水汽的直接凝华过程；当观测者与机尾云相距 10~100 km 时，机尾云成为可见的最小含水量为 $0.02\sim 0.32\text{ g m}^{-3}$ ，以前所采用的最小含水量值 0.004 g m^{-3} 是偏小的；在常压下，湿度为 62% 时，机尾云形成的温度为 -36.5°C 。由于实验条件所限，不同压力、不同湿度条件下，机尾云出现的温度未能确定^[28]。

(4) 积层混合云的降水研究。嵌入层状云的对流云和层状云组成的混合云系统是很重要的降水结构。用建立的积层混合云数值模式研究了暴雨积层混合云的演变过程、两种云的相互作用、云体结构和降水特征，并分析了暴雨产生的物理原因。结果表明，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。积层混合云是一非常有效的降水系统，它和冰相微物理过程是产生暴雨的主要物理原因。研究结果对改进对流参数化方案有重要参考价值^[29]。

3 雷暴探测和雷电物理

20 世纪 60 年代中期的雷暴探测成功地揭示了雷暴的动力场、温度场和电场等要素的结构,为我们研究强对流天气动力学、物理学和电学提供了好的基础。

(1) 观测揭示雷暴动力场结构和电场结构。1964~1966 年,大气物理所研制成调频无线电遥测系统,用气球做运载工具,对北京地区雷雨云进行垂直气流、电场、加速度、水平风、云界以及温度、压力、湿度等多要素的综合探测。地面有跟踪雷达、宏观观测、地面电场仪和气象自计仪等配合观测^[30]。观测发现,在雷雨云前部有随高度呈抛物线分布的系统上升气流,在 6 km 高度上达到极值,达 12.9 m s^{-1} ;在雷雨云后部垂直气流多半不系统,且比前部弱得多,说明雷雨云内垂直上升或下沉气流在不同时期、不同部位存在着复杂的分布;在云体前区有大范围的中低层风场耦合切变(有时达 6 km 以上);云顶的出流大风和云顶上部的弱下沉气流也与垂直气流在雷暴前的迅速增长相互配合;在雷雨云中观测到正负相间的多中心电场结构。云内底部常为正电荷中心,云底外为负电荷,云中电荷中心在 0°C 和 -10°C 层之间。

(2) 雷暴射电结构的观测研究。对雷暴射电进行窄带多频段的观测结果表明:牙克石春季雷暴中多次出现宽频段的连续射电,持续时间在 10 min 以上。有连续射电时,一般降霰、风大;在广州观测到雷暴发展早期的对流云射电,在发展旺盛的浓积云中,都存在弱的放电,其射电信号的频谱成分主要在低频段,信号出现的频数约 $1\sim 3 \text{ 次 min}^{-1}$;射电信号结构在雷暴早期以脉冲与分立脉冲信号居多,盛期则以密脉冲群信号居多。信号的持续时间平均大于 0.5 s,不少信号大于 1 s。雷暴发展愈旺盛,平均持续时间越长。观测还发现,射电高频段的频谱脉动很大,与国外结果有很大差异^[31]。

(3) 一种雷电定位方法。利用雷电辐射的磁场和电场的相位差与雷电距离的关系,提出一种雷电单站定位方法^[32],并相应研制成雷电单站定位仪。利用自行研制的雷电定位仪,进行雷电三站定位观测,1965 年在大兴安岭林区开展近距离探测和服务。在该期间,呼伦贝尔盟大兴安岭林区发生雷击火 89 起,有 59 起雷击火发生时间和位置与雷电探测结果相吻合,占雷击火发生次数的 66%^[33]。

(4) 电场中水滴放电的实验和理论研究。在 20 世纪 60 年代建立的高电压实验室研制成功水滴电谱仪,并开展强电场中水滴放电的实验和理论研究^[34],给出带电水滴不稳定变形时临界电场强度的理论公式^[35]。结果表明,在雷雨云中电场强度值只要达到 5000 V cm^{-1} ,雨滴表面即可以产生火花放电,从而可能促发云中闪电的形成。实验表明,对于悬浮于气流中的水滴,其临界放电场强是具有统计性质的,在一定场强下,有时放电,有时等很长时间(几分钟以上)还不放电。水滴正负两端的放电通常不是同时而是交替进行,多数是滴的上端先放,而后下端放,如果滴还未破碎,则上端又放。

4 云动力学研究

大气物理所的云动力学的理论研究始于 20 世纪 60 年代初。

(1) 动力学基本理论的研究：提出了积云动力学方程组并分析了其基本特点（非静力平衡对流近似，不同类型的波动等）；对线性化后的小尺度运动方程，提出三种不同的消除声波方法，建立滤波后的二维非线性小尺度运动方程组，较系统地总结和阐明了积云动力学的基本理论及其应用^[36~38]；分析和比较多种大气运动学模式，指出相对于静力平衡和地转近似，变形的滞弹性模式（动量无辐散近似）适合于中小尺度运动，并从频散关系上说明动量无辐散近似更接近于完全弹性模式的频散关系^[39]；提出守恒型中小尺度动力学模型的概念，比较系统地研究了各种主要守恒模式的积分不变量、使用范围及应用价值。分析了中小尺度系统中线性小扰动的稳定性；重力内波在层结和风切变影响下的发展演变规律，提出深厚系统中运动非线性稳定性的判定定理^[40]。

(2) 制约积云发展的一些重要因子和过程的研究：提出大气层结对积云发展的重要性，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，这可以解释我国南方雨季中，雨停时常常见的云层迅速分层的现象；研究云中水滴对气流拖带的动力作用，指出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^[41,42]。

(3) 对流云的宏观动力过程和发展环境的研究进展：夏季个体积云的发展和演变规律，积云发展的大气结构的特点和积雨云发展时大气垂直运动的特征，积云发展、演变迅速，云顶垂直发展速度一般为 $3\sim 4\text{ m s}^{-1}$ ^[43]。在积云发展阶段，积云单体的垒积和各单体上面云泡的结构最为明显。在没有系统性天气时，山区积云比山区外积云容易发展，而且发展快、强度大。有积云发展的整层大气是不稳定的^[44]。在积雨云发展前，可能有大型扰动存在。此外，大尺度天气背景下，有一些中小尺度的雷雨系统的回波带，回波带由许多大小不等的回波单体组成，多数排列整齐，排列方向多数与槽线或不连续线取向一致，回波带经过处产生较大降雨^[45]。

(4) 局地积云降水过程对云结构影响的研究：考虑水滴对空气的拖带和降温作用后的计算指出，降水使云中空气垂直运动，云内外温差和含水量都有明显变小，云也由下向上逐渐消散^[46]。此外，通过联立求解雨滴增长和含水量连续方程，得到雨滴增长和云中含水量变化的相互影响关系，说明雨滴的冲刷作用对降水过程有影响，能够解释高山云雾观测中看到的大雨时云中能见度变好，雨停时云雾又笼罩起来等现象^[47]。

5 云和降水的数值模拟研究

为了研究各类云和降水的动力学、热力学和微物理学过程，大气物理所从 20 世纪 60 年代初就开始了云和降水的数值模式和模拟研究。模式的研制及模拟水平不断提高，模式先后从一维发展到二维、三维，从滞弹发展到全弹，从干模式发展到降水模式，模式中的微物理过程从暖云发展到冷云，粒子谱从单参谱发展到双参谱，先后建立了 30 种云雾、降水数值模式，广泛研究云和降水的发生发展过程、下垫面和气象环境对云发展的影响，云与云之间的相互影响，人工影响天气的数值模拟和云化学及酸雨等。

(1) 云和降水数值模式。这些模式基本可以分为四类：

第一类是对流云和降水模式，其中包括二维轴对称积云动力发展模式^[48]，二维平面对称积云降水模式^[49]，积云中云滴群凝结增长模式^[50]和云滴谱分档模式^[51]，二维积层混合云模式^[52]，三维可压缩、时变、非静力的冰雹云模式^[53]，以及后来发展成的双参数冰雹云催化模式^[54]，冰雹云冰雹分档模式^[55]，三维微下击暴流模式^[56]。

第二类是雾和层状云模式，其中包括锋面云系模式、二维雾模式^[57,58]和层状云雨滴分档模式^[59]。

第三类是人工影响天气模式，这类模式多数是在原有降水云模式的基础上发展形成的。如盐粉催化积云降水模式^[60]、影响积云宏观动力过程的模式^[61]、人工屏障对积云降水的影响模式^[62]、三维冰雹云催化模式^[54,63]和爆炸影响对流云的模式。

第四类是云化学和酸雨模式，多数也是在云和降水模式的基础上发展的，其中有重庆酸雨分布模式^[64]、云下雨水酸化模式^[65]、欧拉型酸性污染物输送模式、对流云酸化模式^[66]、区域酸沉降模式^[67]、雨水对云下污染物清除的欧拉型模式^[68]、欧拉型硫化物沉降模式^[69]、东亚硫化物沉降和输送模式^[70]、酸沉降对土壤长期酸化影响模式^[71]。

(2) 利用模式研究了积云和降水的发展过程及对其影响的主要因素。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。云中最大垂直速度中心，在积云的发展初期，位于云的中下部，以后逐渐上升^[72]。利用模式研究了积云发展、降水形成、雨停、云消等积云降水全过程的动力和微物理参量的演变^[73]。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。模拟研究了冷水面对积云降水发展的影响，冷水面造成的水陆环流使近水面的积云受到增强，在移入冷水面后，积云发展受到抑制。积云能否移过冷水面，取决于水陆温差、水面宽度、积云移动速度及积云本身的发展强度等。三维模拟结果指出，冷水面还可以改变对流云的传播路径，使积云不易穿过冷水面，而是绕岸而行^[74]；模拟研究三种理想地形对移动积云发展的影响结果表明，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^[75]。研究指出，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。

(3) 下击暴流模拟研究。对发生在日本的一次灾害性下击暴流模拟研究的结果指出，产生这次下击暴流有三个主要因素：一是在风暴上部形成大量的霰和冰雹，它们的下沉拖带及融化致冷产生很强的下沉气流；二是在中层相对较干（湿度小），使得降水粒子在中下层发生较强的蒸发冷却；三是风速有较强的垂直切变，产生前悬回波结构，很有利于降水粒子从云中落到较干的中层大气，从而引起显著的融化和蒸发^[76]。对干、湿两类微下击暴流在云下的生成和演变过程进行模拟试验结果表明：湿微下击

暴流是由于霰、雹高落速粒子的下降引起的，在地面可以产生很强的危险性水平风切变；干微下击暴流是由冰雪晶降水元在干绝热气层中下落时的蒸发所致，只产生很小的地面降水和降温^[77]。

(4) 单块积云对环境大气能量的转换和输送及普适静力能的影响。研究结果表明，凝结潜热是积云发展的主要能源，但积云对大尺度的反馈主要不是凝结潜热的直接加热，而是通过对流和蒸发等过程使影响区内大气位势不稳定减小，而离云较远的地区层结变得更不稳定。在云内和云下降水区，由于液态或固态水的存在，普适静力能与湿静力能相差较大。这时采用湿静力能分析大气稳定度是不适宜的^[78]。

(5) 层状云和雾的研究。对辐射雾、平流辐射雾、海陆交界处的平流辐射雾的生成、发展和消散的模拟研究结果表明，湍流—辐射作用是雾发展变化的主要因子，大气边界层风场及水汽平流输送对雾的发生地点、时刻和强度也有重要作用^[79]。对中国北方常见的三类典型层状云降水形成过程的研究结果指出：对于由强锋面抬升的深厚层状云系统，高空冰晶是这类云产生降水的主要触发因子，降水强度有周期性起伏变化；对于由弱锋面影响形成的浅薄层状云系统，云滴间的碰并是形成降水的主要过程，地面降水是较均匀的毛毛雨。分档模式可以更真实地描述地面雨滴谱的演变^[80]。

6 人工影响天气研究

人工影响天气是云和降水物理学的应用领域。大气物理所的科技人员将云物理研究与人工影响云雾相联系，在人工影响天气研究中尽可能应用现代研究成果，将观测、试验和数值模拟结合起来，在人工影响天气研究方面取得不少重要成果。

6.1 冰雹云物理和人工防雹研究

1969~1978 年历时近 10 年，大气物理所在山西昔阳县开展了冰雹云和冰雹形成及人工防雹的试验研究，研究方法主要是利用雷达探测资料，不少研究成果在全国发挥了指导作用。1996~2000 年又在陕西旬邑开展了人工防雹减灾技术的研究，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，使冰雹云物理和人工防雹研究取得显著进展。

(1) 冰雹云的形成，冰雹天气的预报，冰雹云的结构、演变以及识别。通过研究，对昔阳地区雷暴和冰雹的概况、降雹时空分布、雹迹特点等得到一些规律性认识^[81]。对冰雹天气形成的天气条件也有深刻的认识，认为高空冷空气的侵入是形成冰雹天气的一个极其重要的因素，提出了一个利用探空资料、分型加指标的单站冰雹短期预报方法，预报准确率接近 90%^[82]。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%^[83,84]。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%^[85]。将我国北方地区冰雹云分成四种类型，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^[86]，提出冰雹云生消演变的五个阶段，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。将冰雹云雷达回波演变分成三个阶段,指出在发展阶段,雷达回波的强度和高度迅速增长。

(2)“炮响雨落”现象研究。在北京八达岭进行土炮降雨试验发现,炮击浓积云后 1~2 min 就下一阵雨,先后连续 3 次“炮响雨落,炮停雨止”。在山西昔阳用高炮轰击云时发现,原来没有降水的云,炮击后 1.5~2.0 min 产生降雨,原来已降雨的云,炮击后,雨强明显增大,并且炮击后云滴谱变宽并出现双峰^[87];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。对冰雹云进行了 11 次炮击试验,其中 9 次在炮击部位出现雷达回波窟窿、空洞或弱区;7 次看到炮击后回波顶高下降、云体减弱、强区分裂等现象,5 次炮击后降雹有所减弱,即炮点附近有雹而本站无雹或解除冰雹云警报。以上野外试验表明,炮击(爆炸)对云和降水有明显的影。

(3)爆炸对冰雹云中上升气流的影响。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,并进行一系列研究。用燃烧艾条产生烟柱模拟上升气流,用小土炮模拟爆炸源的实验结果表明,炮击后 0.2~0.3 s,在爆炸波的作用下,出现烟柱摆动现象,1 s 之后烟道恢复到原来直上的状态。引起烟柱摆动的临界超压为 2 g cm^{-2} 。根据相似原理,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^[88]。在室内和野外试验的基础上,提出爆炸影响云中上升气流的假设,认为爆炸波扰动和减弱云中上升气流,导致破坏降水粒子的下落末速与上升气流的平衡,引起降水粒子下沉、拖带、下沉气流发展,从而破坏云的自然发展过程,造成“炮响雨落”,“云体减弱、消散”,“降雹减弱”等现象。爆炸在云发展阶段,如果云中上升气流受到局地短时的抑制或减弱,就可以产生“炮响雨落”现象,云总体上提前消亡,总降雨降雹量明显减少^[89]。

(4)冰雹的形成、增长、催化和冰雹云预测研究。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,人工防雹的催化部位应在源区。在冰雹形成过程中,作为雹胚的霰和冻滴主要通过撞冻过冷水增长。撞冻增长占增长量的大部分,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^[90]。研究揭示了多单体风暴中冰雹的循环增长机制。在较强的冰雹云中除了有主上升气流(主单体)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。云中不同部位的冰雹谱分布及其演变,与飞机穿云观测值基本一致。但与 M-P 分布差别较大^[91]。对冰雹形成机制和催化防雹机制的研究指出,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。人工防雹的“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,起到减雹和防雹作用^[92]。对陕西等实际冰雹云进行数值模拟说明,14 块冰雹云中,有 11 块存在含水量累积带,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}),对累积带进行人工催化可以获得较好的防雹效果^[93]。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^[94]。多参数雷达识别冰雹云的数值模拟研究表明，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^[95]。

(5) 人工防雹技术方法。通过用单站统计方法预报当天有无冰雹，用雷达监视和识别冰雹云，用高炮对冰雹云作业，用对比统计方法说明防雹效果等一系列方法，改进了原有的“用眼看，土炮轰”的落后方法，走上较为科学的人工防雹之路。这套人工防雹技术方法在国内被广为采用。人工防雹效果的统计检验结果表明，约有 10 个地区，开展人工防雹后灾情减少 50% 左右，也有一些地区效果不明显^[96]。在陕西旬邑地区，用 45 dBZ 回波顶温度和顶高作为指标识别冰雹云的方法，研究人工防雹的优化作业方法。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（强中心回波、强度在 40~45 dBZ）进行作业为最佳。冰雹形成后作业效果降低，但仍有一定成效。另外，还提出了用火箭进行人工防雹作业的指导性方法^[97,98]。

6.2 人工增雨研究

(1) 人工增雨试验研究。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部反复播撒颗粒很大的盐粒，得到明显的人工降水效果。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^[99]。在新安江开展的积云和层状暖云的人工降水试验提出了催化积云产生降水的方法和指标，如：航空区域天气图上气流有耦合，700 hPa 以下的比湿总和大于 50 g kg^{-1} ，云厚大于 2.5 km。根据盐粉和水对积云催化后的结果（催化后 40% 降雨，52% 消云，8% 变化不明显）认为，增加大水滴的暖云催化理论不能解释实际发生的事实，提出盐粉或水撒入云中后可能产生动力作用，加入的大滴可能影响云中的气流结构。新安江流域的飞机人工降雨效果的区域回归统计分析得到的增雨效果为，增雨约 7%^[100,101]。盐粉催化积云降水的数值模拟试验结果表明，在合适的条件下，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降雨效率高，但在云中生长时间长，一般采用几十微米至一百微米直径的盐粉为宜^[102]。

(2) 人工消雾研究。在对上海、南京和合肥机场的消暖雾试验中，催化剂主要用氯化钙小颗粒，也试过生石灰粉。30 次试验表明，氯化钙是一种良好的暖雾催化剂，比以往用过的盐粉、水、生石灰等催化剂都好，对于较薄的辐射雾消雾效果更好。厚度在 100 m 以下的雾，催化后可以见到地面；厚度在 50 m 以下的雾，雾消区比较宽，并能清楚见到地面，飞机可以降落。因此，可以认为，用飞机播撒氯化钙消暖性辐射雾能够开放机场。

(3) 人工影响积云宏观动力过程的数值试验结果表明，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^[103]。另外,我们还开展了人工屏障对积云发展影响的数值模拟研究^[62]。

7 云化学和酸雨的研究

(1) 酸雨的基本特征和云化学观测分析研究。云化学和酸雨研究始于 20 世纪 80 年代初,首先对酸雨做大范围的观测,揭示了这些地区酸雨的基本特征,得到一些规律性认识:雨水酸度与雨滴微物理特性有关,一般是小雨滴较酸;雨水酸化与污染源的方位和距离有关,也与天气有关;重庆、贵阳等地市中心的雨水酸度大,郊区小,在远郊区和乡村地区雨水一般不酸,是典型的城市局地污染源形成的酸雨区;上海、南昌、广州、东海等地酸雨与天气形势和风向有一定关系,除本地影响外,还受外地输送的影响^[104,105]。

对我国若干地区的云化学特性观测分析说明,重庆、成都和贵阳三地区云水已酸化,其酸度已高于地面雨水。重庆地区云水酸化地域范围从大城市扩大到县城。云水中的 H_2O_2 和 S(IV) 浓度均高于地面雨水中的相应值,但是, SO_4^{2-} 浓度则相反,表明云下明显存在 S(IV) 被 H_2O_2 液相成 SO_4^{2-} 的过程。西南地区云水阴离子中 SO_4^{2-} 已占绝对优势,属硫酸型,两广地区云水酸化属硫酸和硝酸的混合型,在湖南、江西云水中离子总浓度很高,云中 H_2O_2 也超量^[106~108]。中国、日本和美国降水化学特征的对比分析结果指出,虽然三国都有酸雨,但降水化学组分有很大的不同。中国降水中 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 NH_4^+ 浓度很大,日本降水中 Cl^- 和 Na^+ 浓度很高,而美国降水中 NO_3^- 相对较高。中国各地降水酸度和化学组分有明显的差异:长江以南有严重酸雨,北方一般没有酸雨但雨水中离子浓度很高,其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 的浓度比南方高 2~4 倍, SO_4^{2-} 高 1.3 倍。在中国, SO_4^{2-} 是主要阴离子,在中国西北和川黔地区,所占比例高达 81%, Ca^{2+} 和 NH_4^+ 在北方的阳离子中比例很高,西北雨水中 Ca^{2+} 浓度最大,而在华东地区降水离子中 NH_4^+ 浓度较高^[109]。

(2) 云化学和酸雨的数值模拟研究。模拟研究结果表明,重庆严重的酸雨以云下过程形成为主,主要是云下 SO_2 与 H_2O_2 氧化的结果,气溶胶起较弱的缓冲(碱化)作用^[110]。在我国西南地区的重庆和贵阳等重污染城市,云下过程对雨水的酸化起主要作用,对雨水中的重要酸碱离子浓度也有明显影响。在污染较轻的中小城市和乡村地区,雨水酸度和主要酸碱离子浓度主要取决于云内过程。云下气溶胶对雨水中 SO_4^{2-} 的贡献一般不超过 20%,但气溶胶对雨水中的 NH_4^+ 和 NO_3^- 的贡献可达 20%~60%^[111], NH_3 的存在使雨水中 pH 值明显增大。地面雨水 pH 值与 SO_2 浓度呈非线性相关,当 SO_2 浓度小于 20×10^{-9} 时,雨水 pH 值对 SO_2 浓度反应比较敏感^[68]。各地云内和云下过程对雨水酸度的影响有所不同,成都以云内为主,贵阳、重庆、上海、吉林、北京、长沙以云下过程为主,桂林、南昌、广州则云内和云下过程的作用相当;各地云下气溶胶对雨水均起碱化作用,南方地区气溶胶消耗雨水中 H^+ 的 11%~15%,北方地区达 60%~70%。吉林、北京和上海雨水 pH 值对 SO_2 浓度变化敏感,若这些地区 SO_2 污染加重,则出现酸雨或 pH 值进一步下降。重庆、贵阳、南昌和桂林等地 SO_2 浓度变化对

雨水 pH 值不敏感，成都、长沙和广州则界于上述两类之间。各地雨水 pH 值对 NH_3 浓度的变化是很敏感的，对 H_2O_2 浓度变化也有明显影响。垂直上升气流使云中酸化过程得到加强。云滴与雨滴微物理结构的不同，对污染气体的吸收影响很大，小云滴比雨滴更易酸化。在研究对流云酸化过程时，不考虑污染气体向液水的质量传输过程，完全用溶解平衡方法处理，有相当局限性^[112]。

(3) 酸性物质输送模式模拟研究。用欧拉型长距离输送模式，研究了国内几个典型地区（川黔、两广、浙江等） SO_2 的输送问题。结果表明，重庆和贵阳等地 SO_2 污染严重，主要是本地排放源起作用。上海地区受局地污染源影响较小，当地的污染物有相当部分被输送到它的东部邻海；两广地区的 SO_2 与外界的交换较大。利用这些区域酸性物质输送模式，在国内首次研究分析了我国和东亚地区硫沉降量和浓度的三维时空分布特点，我国各大区、各省之间硫污染物的相互输送量，也计算分析了东亚各国和地区之间硫污染物的跨边界输送势态，并对我国和东亚未来硫沉降及输送做了预测。通过对比计算，气溶胶表面非均相化学过程在区域硫沉降中起重要作用，另外，对流云的垂直输送也应予以考虑^[70,113]。

(4) 土壤长期酸化过程的动态模型研究。利用模式分别讨论温州红壤和北京褐土的酸沉降临界负荷。结果表明，以硫沉降即酸沉降和硫沉降非酸沉降两观点分别确定红壤的临界负荷，后者的值仅为前者的 47%，差异显著，应加以区别。从临界负荷的定义，所选用的指示生物及其化学临界值，目前所运用的研究方法、实测资料的缺乏等方面分析，临界负荷研究中存在不确定性。目前应用于临界负荷研究中的稳态和动态模型的模拟能力也还很有限^[114,115]。

9 结束语

中国科学院大气物理研究所的云雾、降水和人工影响天气研究经历了近半个世纪的历程。在学术研究中，研究所始终坚持理论和实践相结合，观测与理论（数值模拟）研究相结合的科研道路，始终面向国家政治和经济发展的需求，其中云雾观测研究、暖云降水理论研究、云化学观测研究等处于国内领先地位，并有一些研究成果被国际同行所承认和应用。

我们深信在未来的日子里云雾、降水和人工影响天气研究会有更大的进展。

参 考 文 献

- 1 顾震潮等，南岳云雾降水物理观测（1960年3—8月）结果的初步分析，我国云雾降水微物理特征问题，北京：科学出版社，1962，2~21。
- 2 陈炎涓，我国几个地方巨型盐核分布的一些特点，我国云雾降水微物理特征问题，北京：科学出版社，1962，22~29。
- 3 何珍珍、沈志来等，屯溪地区巨盐核浓度分布特点，大气科学，1984，8（2），211~218。
- 4 沈志来、黄美元等，西太平洋热带海域海盐粒子的观测和结果，大气科学，1989，13（1），87~91。
- 5 章光锟，南岳云滴谱资料（1960年9月—1961年8月）的初步分析，我国云雾降水微物理特征问题，北京：科学出版社，1962，36~46。

- 6 詹丽珊, 南岳大水滴观测资料 (1960 年 10 月—1961 年 5 月) 初步总结, 我国云雾降水微物理特征问题, 北京: 科学出版社, 1962, 47~50.
- 7 洪钟祥、黄美元, 南岳水滴谱第二极大及其他特征, 我国云雾降水微物理特征的研究, 北京: 科学出版社, 1965, 18~29.
- 8 詹丽珊、陈万奎、黄美元, 南岳和泰山云中微结构起伏资料的初步分析, 我国云雾降水微物理特征的研究, 北京: 科学出版社, 1965, 30~40.
- 9 黄美元, 积云的微物理结构, 苏联地球物理学报 (俄文), 1963, **2**, 362~376.
- 10 黄美元、何珍珍、沈志来等, 暖性层积云中大水滴的分布特征, 气象学报, 1983, **41** (3), 356~364.
- 11 魏绪林, 南岳雨滴谱观测 (1960 年 7 月—1961 年 8 月) 结果的初步分析, 我国云雾降水微物理特征问题, 北京: 科学出版社, 1962, 51~57.
- 12 阮忠家, 南岳阵雨雨滴谱连续取样观测 (1961 年 8 月) 结果的初步分析, 我国云雾降水微物理特征问题, 北京: 科学出版社, 1962, 58~63.
- 13 黄美元、洪延超, 梅雨锋云系中层状云回波结构和降水的不均匀性, 气象学报, 1984, **42** (1), 23~30.
- 14 洪延超、黄美元, 层状云亮带不均匀性的理论探讨, 大气科学, 1984, **8** (2), 198~204.
- 15 洪延超、黄美元等, 梅雨锋云系中尺度系统回波结构及其与暴雨的关系, 气象学报, 1987, **5** (1), 56~64.
- 16 黄美元、徐华英、洪延超, 积层混合云中中层状云对积云发展的影响, 成都气象学院学报, 1986, **1**, 48~54.
- 17 吴玉霞, 夏季对流云初期回波与降水之间的关系, 大气科学, 1984, **8** (1), 89~95.
- 18 顾震潮, 论近年来云雾滴谱形成理论的研究, 气象学报, 1962, **32** (2), 267~284.
- 19 周秀骥, 暖云降水微物理机制的统计理论, 气象学报, 1963, **33** (1), 97~107.
- 20 周秀骥, 暖云降水微物理机制的研究, 北京: 科学出版社, 1964.
- 21 温景嵩, 起伏场的相关时间对水滴随机长大的作用, 气象学报, 1964, **34** (3), 369~377.
- 22 徐华英、顾震潮, 起伏条件下重力碰并造成的暖性薄云降水, 气象学报, 1963, **33** (1), 108~114.
- 23 徐华英、李桂忱, 有云泡结构的对流云中降水形成的研究, 气象学报, 1980, **38** (2), 260~268.
- 24 徐华英、黄培强、黄美元等, 积云中水滴群凝结增长的数值模拟, 大气科学, 1983, **7** (3), 249~259.
- 25 肖辉、徐华英、黄美元, 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, 大气科学, 1988, **12** (3), 312~319.
- 26 孔凡铀、黄美元、徐华英, 对流云中冰相过程在积云发展中的作用的三维数值模拟研究, 中国科学 (B 辑), 1991, **15** (6), 78~88.
- 27 王昂生、N. Fukuta, 冰晶增长规律的定量研究, 大气科学, 1984, **8** (3), 242~251.
- 28 黄美元、陈景南等, 有关机尾云形成的几个问题, 提交空司的总结报告, 1966.
- 29 洪延超, 积层混合云数值模拟研究 (II) 云相互作用及暴雨产生机制, 气象学报, 1996, **54** (6), 661~674.
- 30 袁箴、蒋本汤、任丽新等, 强电场探空仪及雷雨云电场探测结果的分析, 气象学报, 1965, **35** (4), 440~448.
- 31 吕达仁等, 中国科学院大气物理研究所集刊第 4 号, 雷暴探测和雷电物理研究, 北京: 科学出版社, 1976.
- 32 陈仲文等, 中国科学院大气物理研究所集刊第 4 号, 雷暴探测和雷电物研究, 北京: 科学出版社, 1976.
- 33 孙景群、郑达洲, 中国科学院大气物理研究所集刊第 4 号, 雷暴探测和雷电物理研究, 北京: 科学出版社, 1976.
- 34 赵燕曾、谢威光、周秀骥等, 中国科学院大气物理研究所集刊第 4 号, 雷暴探测和雷电物理研究, 北京: 科学出版社, 1976.
- 35 周秀骥、秦瑜, 水滴电化碰并机制的初步探讨, 云雾降水微物理的一些理论问题, 北京: 科学出版社, 1963.
- 36 巢纪平、周晓平, 积云动力学, 北京: 科学出版社, 1964.
- 37 巢纪平, 论小尺度过程动力学的一些基本问题, 气象学报, 1962, **32** (2), 104~118.
- 38 周晓平、李兴生、张耀科等, 积云发展问题的数值试验, 气象学报, 1964, **34** (4), 457~485.
- 39 张可苏, 在有源和耗散情况下的大气适应过程, 大气科学, 1980, **4** (3), 199~211.
- 40 Sun Litan, and Huang Meiyuan, Improving the vorticity—stream function method to solve two—dimensional anelastic and nonhydrostatic model, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1994, **11** (2), 247~249.

- 41 巢纪平, 层结大气中热对流发展的一个非线性分析, 气象学报, 1961, **31** (3), 191~204.
- 42 顾震潮、胡广兴, 凝结反馈对云层垂直发展影响的一个非线性理论, 气象学报, 1962, **32** (1), 64~70.
- 43 陈瑞荣, 个体积云发展演变特性的一些研究, 气象学报, 1963, **33** (2), 257~270.
- 44 陈瑞荣, 个体云中降水分布不对称性对个体积云移动的影响, 气象学报, 1964, **34** (1), 122~125.
- 45 陶丽君、归佩兰等, 1962年7-8月泰山地区几次雷雨过程雷达回波的初步分析, 我国对流云的宏观特征问题, 北京: 科学出版社, 1964, 1~39.
- 46 陈瑞荣等, 1962年7-8月泰山地区积云及大气层结和垂直气流的观测分析, 我国对流云的宏观特征问题, 北京: 科学出版社, 1964, 62~68.
- 47 黄美元, 关于雨滴冲刷作用及其降水过程的影响, 我国云雾降水微物理特征的研究, 北京: 科学出版社, 1965, 92~98.
- 48 周晓平、李兴生、张耀科等, 积云发展问题的数值试验, 气象学报, 1964, **34** (4), 457~485.
- 49 徐华英、李桂忱, 有云泡结构的对流云中降水形成的研究, 气象学报, 1980, **38** (3), 260~268.
- 50 徐华英、黄培强、黄美元等, 积云中雨滴群凝结增长的数值模拟, 大气科学, 1983, **7** (3), 249~259.
- 51 肖辉、徐华英、黄美元, 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, 大气科学, 1988, **12** (3), 312~319.
- 52 洪延超, 积层混合云数值模拟研究 (I) 模式及其微物理过程参数化, 气象学报, 1996, **54** (5), 542~557.
- 53 孔凡铀、黄美元, 徐华英对流云中冰相过程的三维数值模拟 I. 模式建立及冰云参数化, 大气科学, 1990, **14** (4), 441~453.
- 54 洪延超, 三维冰雹云催化数值模式, 气象学报, 1998, **56** (6), 641~653.
- 55 郭学良、黄美元、洪延超等, 三维冰雹分档强对流云数值模式研究 II. 冰雹粒子的分布特征, 大气科学, 2001, **25** (6), 856~864.
- 56 孔凡铀、黄美元、徐华英, 微下击暴流的数值模拟, 大气科学, 1994, **18** (1), 11~21.
- 57 孙旭东、徐华英, 二维平流辐射雾的数值模拟, 大气科学, 1991, **15** (6), 99~109.
- 58 钱敏伟, 长江上空辐射雾的数值研究, 大气科学, 1990, **14** (4), 483~490.
- 59 郭学良、黄美元、徐华英等, 层状云降水微物理过程的雨滴分档数值模拟, 大气科学, 1999, **23** (6) 745~752.
- 60 徐华英、郝京甫, 盐粉催化积云降水的数值模拟, 大气科学, 1983, **7** (4), 403~410.
- 61 徐华英、黄美元、郝京甫, 人工影响积云宏观动力过程的数值试验, 中国南方云物理和人工降水文集, 北京: 气象出版社, 1986, 121~124.
- 62 Ji Wusheng, and Huang Meiyuan, A numerical simulation of cloud formation and rain production using an artificial obstacle, Fifth WMO Scientific Conf. On Weather Modification and Applied Cloud Physics, Beijing, 1989, 233~234.
- 63 黄燕、徐华英, 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验, 大气科学, 1994, **18** (5), 612~622.
- 64 雷孝恩、贾新媛等, 重庆酸雨分布的一个数值模拟, 大气科学, 1985, **9** (3), 276~284.
- 65 刘帅仁、黄美元, 云下雨水酸化过程数值模拟及重庆酸雨形成机制的探讨, 大气科学, 1988, 特刊, 245~257.
- 66 雷恒池、黄美元, 对流云中酸化的数值模拟, 环境科学学报, 1992, **12** (4), 415~426.
- 67 贾新媛, 区域酸沉降模式, 大气科学, 1993, **17** (6), 732~740.
- 68 姚克亚、黄美元、陆全明, 雨水对云下污染物清除的 Euler 模拟, 中国科学技术大学学报, 1995, **25** (2), 148~153.
- 69 高会旺, 欧拉型区域硫沉降模式研究, 大气科学, 1997, **21** (5), 615~626.
- 70 王自发、黄美元、何东阳等, 关于我国和东亚酸性物质的输送研究 I. 三维欧拉污染物输送实用模式, 大气科学, 1997, **21** (3), 366~378.
- 71 An Junling, and Meiyuan Huang, Long-term soil acidification model (LTSAM) development and application for analyzing soil responses to acidic deposition, *Water, Air and Soil Pollution*, 1999, **110**, 255~272.
- 72 周晓平、李兴生、张耀科等, 积云发展问题的数值试验, 气象学报, 1964, **34** (4), 457~485.

- 73 徐华英、吉武胜、黄美元, 风切变对积云发展影响的数值模拟研究, 大气科学, 1988, **12** (4), 405~411.
- 74 孔凡铀、黄美元、徐华英, 冷水面对积云的影响——数值试验, 大气科学, 1987, **11** (2), 160~166.
- 75 孔凡铀、黄美元、徐华英, 山地对积云的影响数值模拟, 南京气象学院学报, 1988, **2**, 144~151.
- 76 Guo Xueliang, H. Niino, and R. Kimura, Numerical simulation of a downburst-producing intense convective storm; some preliminary results. Preprints RIMS Symposium on Mathematical Aspects of Thermal Convective Dynamics; Structure of Flow Fields, Research Institute of Mathematical Science, University of Kyoto, Japan, 1999, 1115, 165~180.
- 77 孔凡铀、黄美元、徐华英, 微下激暴流的数值模拟, 大气科学, 1994, **18** (1), 11~21.
- 78 林文实、徐华英、黄美元, 单块积云对环境大气能量的转换和输送, 大气科学, 1991, **15** (5), 1~10.
- 79 孙旭东、徐华英、李桂忱等, 海陆交界处平流辐射雾的二维数值模拟, 热带气象, 1990, **6** (1), 52~56.
- 80 郭学良、黄美元、徐华英等, 层状云的雨滴谱分档数值模拟研究, 大气科学, 1999, **23** (4), 411~421.
- 81 黄美元、王昂生, 人工防雷导论, 北京: 科学出版社, 1980.
- 82 于仁成、何珍珍, 昔阳地区的冰雹天气形势和冰雹预报, 冰雹和人工防雷研究, 北京: 科学出版社, 1983, 20~31.
- 83 刘锦丽、郭裕福、杨培才, 冰雹云雷达回波的统计特征, 冰雹和人工防雷研究, 北京: 科学出版社, 1983, 52~59.
- 84 杨培才、郭裕福、刘锦丽等, 华北地区降雹回波系统的分类及单体特征, 大气科学, 1980, **4** (3), 230~244.
- 85 王昂生、黄美元等, 防雷时识别雷雨云的闪电观测, 科学通报, 1976, **12**, 546~549.
- 86 王昂生、黄美元, 冰雹云物理发展过程的一些研究, 气象学报, 1980, **1**, 64~72.
- 87 徐华英、何珍珍等, 炮击和雷电对降水的影响, 冰雹和人工防雷研究, 北京: 科学出版社, 1983, 96~106.
- 88 徐华英、何珍珍、陈章昭等, 爆炸影响上升气流的模拟实验, 冰雹和人工防雷研究, 1983, 84~95.
- 89 黄美元、徐华英等, 爆炸影响对流云发展过程的原理研究, 大气科学, 1979, **3** (3), 280~288.
- 90 洪延超、肖辉、李宏宇等, 冰雹云中微物理过程研究, 大气科学, 2002, **26** (3), 421~432.
- 91 郭学良、黄美元、洪延超等, 三维冰雹分档强对流云数值模式研究 I. 模式建立及冰雹的循环增长机制, 大气科学, 2001, **25** (5), 707~720.
- 92 洪延超, 冰雹形成机制及催化防雷机制研究, 气象学报, 1999, **57** (1), 30~44.
- 93 周玲、陈宝君等, 冰雹云中累积区与冰雹的形成的数值模拟, 大气科学, 2001, **25** (4), 536~550.
- 94 胡朝霞、李宏宇、肖辉等, 旬邑冰雹云的数值模拟和累积带特征, 气候与环境研究, 2003, **8** (2), 49~61.
- 95 漆梁波、黄美元、肖辉等, 多波长雷达识别冰雹的数值研究, 大气科学, 2002, **26** (1), 30~40.
- 96 黄美元等, 昔阳县人工防雷效果统计分析, 冰雹和人工防雷研究, 北京: 科学出版社, 1983, 107~110.
- 97 李宏宇、胡朝霞等, 人工防雷使用催化方法数值研究, 大气科学, 2003, **27** (2), 212~221.
- 98 肖辉、吴玉霞、胡朝霞等, 旬邑地区冰雹云的早期识别及数值模拟, 高原气象, 2002, **21** (2), 159~166.
- 99 顾震潮等, 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, 我国云雾降水微物理特征问题, 北京: 科学出版社, 1962.
- 100 黄美元、何珍珍、沈志来等, 新安江流域上空云内外盐核的分布, 大气科学, 1982, **6** (3), 301~307.
- 101 黄美元、何珍珍、沈志来等, 暖性层状云中大云滴的分布特征, 气象学报, 1983, **41** (3), 356~364.
- 102 徐华英、郝京甫, 盐粉催化积云降水的数值模拟, 大气科学, 1983, **7** (4), 403~410.
- 103 徐华英、黄美元、郝京甫, 人工影响积云宏观动力过程的数值模拟, 中国南方云物理和人工降水文集, 北京: 气象出版社, 1986, 121~124.
- 104 何珍珍、金安简、黄美元等, 雨水酸度与降雨物理特性的关系, 大气科学, 1985, **9** (4), 442~446.
- 105 沈志来、黄美元、吴玉霞, 西太平洋热带海域雨水化学组成, 大气科学, 1988, 特刊, 328~332.
- 106 黄美元、沈志来等, 重庆地区云水和雨水酸度及其化学组成的观测分析, 大气科学, 1988, **12** (4), 389~395.
- 107 沈志来等, 我国重酸雨地区云水化学的观测研究, 科学通报, 1996, **41** (4), 338~340.
- 108 沈志来、吴玉霞、肖辉等, 我国西南地区云水化学的某些基本特征, 大气科学, 1993, **17** (1), 87~96.

- 109 黄美元、植田洋匡、刘帅仁，中国和日本降水化学特性的分析比较，大气科学，1993，**17** (1)，27~38.
- 110 刘帅仁、黄美元，云下雨水酸化过程数值模拟及重庆酸雨形成机理的探讨，大气科学，1988，特刊，245~257.
- 111 黄美元、沈志来等，中国西南典型地区酸雨形成过程研究，大气科学，1995，**19** (3)，359~366.
- 112 雷恒池、黄美元，对流云中酸化的数值模拟，环境科学学报，1992，**12** (4)，415~426.
- 113 黄美元、王自发、何东阳等，我国冬夏季硫污染物沉降与跨地区输送模拟研究，科学通报，1996，**41** (11)，1013~1016.
- 114 安俊岭、黄美元、高会旺等，温州红壤的酸沉降临界负荷研究，环境化学，1988，**17** (2)，136~142.
- 115 安俊岭、黄美元、陶树旺等，长期土壤酸化模型 (LTSAM)，环境科学学报，1999，**19** (3)，284~291.

Advance of Research on Cloud and Precipitation and Weather Modification in the Latest Half Century

Huang Meiyuan, Shen Zhilai, and Hong Yanchao

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract The advance of research on cloud, fog, precipitation and weather modification in the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences in the latest half century is reviewed and summarized in this article. Close to the national economy needs and the international advanced research projects, problems that being raised, ways in research, innovation thoughts, and the results got in each field such as cloud and precipitation physics, cloud dynamics, cloud and precipitation numerical simulation, cloud chemistry and acid rain, thunderstorm detecting and thunder and lightning physics, and weather modification, etc. are discussed exactly in scientific viewpoint. The paper favors at last a way rising from observation facts to theory with practice and theory united. Achievement is presented. Those representative scientific papers are also listed in the reference.

Key words: cloud and precipitation; observation and experiment; artificial precipitation; hail suppression; numerical simulation