

南京信息工程大学 60 年来在大气物理学领域的若干重要研究进展

银燕*, 李子华, 刁一伟, 朱彬, 牛生杰, 马革兰, 陆春松, 张其林, 郭凤霞, 李煜斌, 陈景华, 刘晓莉, 蒋惠, 师正, 侯学伟, 康汉卿

南京信息工程大学 大气物理学院/中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044

* 联系人, E-mail: yinyan@nuist.edu.cn

2020-12-08 收稿, 2021-02-26 接受

国家自然科学基金重大项目(41590873); 西北人工影响天气工程项目(ZQCR18211)

摘要 着重对南京信息工程大学建校 60 年来在云雾理化特性及微结构、冰雹形成微物理机制、电线积冰机理、人工影响天气理论与实践、大气气溶胶的理化特性及其对云降水的影响、大气边界层物理以及雷电过程等大气物理学领域的几个主要方面所开展的科学研究工作做简要回顾。

关键词

大气物理;
积层混合云;
冰雹;
冰核;
气溶胶-云相互作用

1 云雾理化特性及微结构观测研究

1.1 关于雾的研究

早在“七五”期间, 李子华与重庆市气象局等单位合作, 承担国家科委重点课题“重庆市区雾害成因及潜势预报警报服务系统”。组织了当时国内少有的大规模外场综合观测试验, 对重庆市冬季雾进行了两次多学科综合探测, 详细分析了地形、山谷风、河流、辐射和城市热岛等因子的作用, 揭示了复杂地形条件下重庆雾的许多独有的物理化学特性, 对雾形成的物理过程和酸雾机理提出了新的认识, 为雾的预测和污染治理提供了科学依据。研制的重庆市区雾的潜势预报警报服务系统, 采用多种方法综合分析预报, 考虑因子全面, 预报成功指数达 84.5%, 取得明显的社会效益。研究发表学术论文十余篇(李子华, 2014)。王鹏飞先生当时认为该研究在重庆雾的宏微观结构及其成因、城市热岛

及空气污染对雾的双重效应等方面, 提出了不少新的观点并有许多重大发现, 这对重庆雾的认识有了一个可喜的深化。部分研究成果获得 1992 年国家气象局科学技术进步三等奖。

1997 年冬季, 李子华与云南省气象局合作, 在国家自然科学基金资助下, 在西双版纳的景洪站和勐养站进行了雾的观测。观测人员主要是我校大气物理专业师生。这次研究发现西双版纳雾常常先形成于低空而后及地, 而且具有双层结构和爆发性发展特征。西双版纳自 20 世纪 70 年代末起的近 20 a, 生态环境变化特别巨大。从而导致雾日明显减少, 起雾时间推迟, 雾消时间提前, 雾水含量减小。研究揭示了生态环境变化对雾的影响, 为保护生态环境提供了科学依据。关于西双版纳雾的研究结果发表在《气象学报》《南京气象学院学报》等期刊(李子华, 2001)。“西双版纳地区辐射雾物理化学特征及其成因研究”获云南省 2001 年科学技术奖三等奖。

雾能够显著影响大气能见度, 从而对交通运输

引用格式: 银燕, 李子华, 刁一伟, 等, 2021. 南京信息工程大学 60 年来在大气物理学领域的若干重要研究进展[J]. 大气科学学报, 44(2): 178-188.

Yin Y, Li Z H, Diao Y W, et al., 2021. Advances in selected subjects of atmospheric physics in Nanjing University of Information Science and Technology (NUIST) during her 60 years of development[J]. Trans Atmos Sci, 44(2): 178-188. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201208001. (in Chinese).

产生重要影响。沪宁高速公路通车以后,因大雾造成的灾害时有发生。李子华与江苏省气象研究所合作,于 1996 年 11—12 月在沪宁高速公路进行雾的观测,利用雾滴谱仪等仪器获得了沪宁高速公路汤山站雾的生成过程中边界层与雾微物理特征的变化特征,揭示了几种使雾爆发增强的触发因子和边界层结构特征,发现了强浓雾常与重污染共存,故而提出了大量 $\text{PM}_{2.5}$ 在过饱和条件下凝成雾滴,而 SO_2 、 NO_2 等污染气体在低温高湿条件下,发生气粒转化,进而形成雾滴的科学设想(李子华, 2001, 2014),为强浓雾的预报提供了重要指标。研究第一次提出雾爆发性发展及空气污染物影响雾的微结构等新的观点。对高速公路雾的预报预警都提供了有力的科学支撑。

长江三角洲地区是我国雾的高发区之一,为了深入研究该地区雾形成的物理机制和监测预警方法,牛生杰等在国家自然科学基金项目“持续性浓雾爆发性增长的高分辨率观测和大涡模拟”和科技部公益性行业(气象)专项“长江三角洲雾害监测预警及灾情评估研究”资助下,对长三角地区辐射雾微物理结构与其形成的边界层特征以及它们演变过程中结构的变化进行了系统、深入地研究,取得了重要研究成果(Niu et al., 2010a, 2010b; Liu et al., 2011; 赵丽娟和牛生杰, 2012; 牛生杰等, 2016)。陆春松等(2011)对南京地区冬季雾多发期的边界层特征进行了分析,发现较强的逆温、较低的温度和较小的近地层风速是南京冬季雾形成的背景条件,雾顶的爆发性发展是湍流促使水汽向上输送、在上层逆温下累积并伴随大幅降温引起的;近地层冷平流降温导致饱和水汽压减小和上层系统性的下沉增温引起逆温增强而导致的水汽累积是地面雾浓度爆发性增强的原因(陆春松等, 2010)。这些研究促进了我们对浓雾形成的认识,为长三角大雾的预报预警提供了有力的科学支撑。据《气象科技进展》统计,南京信息工程大学大气物理学院李子华、牛生杰、杨军为全国发表雾主题论文最多的作者。牛生杰(2014)出版了以雾为主题的专著《雾物理化学研究》。

1.2 梅雨锋积层混合云观测研究

梅雨锋降水是江淮地区主要降水系统之一。梅雨持续期的长短、降水量的多少和这个地区工农业生产有着密切的关系。搞清梅雨特征以及发生、发展规律,有着十分重要的意义。为此,1980、1981 年的梅雨时期,李子华等在安徽省中部的白湖地区,利用 711 测雨雷达以及雨量站网,对梅雨锋降水回波

和降水量进行了比较系统的观测。在观测梅雨时,发现常有对流云嵌入大片层状云,这类云常能产生暴雨。李子华等(1986a)将之定名为积层混合云。观测发现,积层混合云降水最多,约占 70%,积层混合云降水回波在 0°C 层等温线的下方可能存在一个几百米厚的融化层。在层状云的融化层以上,强积层混合云的反射率因子 Z 的对数值随高度下降而线性陡增。对一次梅雨锋强降水过程进行的综合探测发现,新的积层混合云回波带的产生与辐合线的形成密切相关—锋前暖区回波带出现强降水时,常在它的南侧产生一条辐合线,继而在辐合线上形成许多对流单体,并逐渐发展成强积层混合云回波带(李子华等, 1986b)。当强积层混合云降水持续或加强时,辐合线上对流单体也随之发展,形成新的强积层混合云回波带,且出现对应的新雨区,替代原来的强降雨区(李子华等, 1986c)。由于积云与周围层状云比较起来,冰相粒子大,上升气流强,含水量丰富,因为积云部位亮带强度要比周围层状云大得多,这就导致了积层混合云亮带的不均匀结构(李子华等, 1986d)。把梅雨锋降水分为四个主要类型:1)积层混合云降水,即在大片层状云降水内嵌入对流云降水;2)纯层状云降水;3)积雨云带降水,即强对流云降水;4)小积云单体降水,即弱对流云降水,单体尺度较小,一般不足 10 km,垂直发展较低,一般小于 7 km。

李子华等的后续研究结果发现,积层混合云亮带回波与纯层状云比较起来,有许多明显的差异,结构不均匀,厚度和强度也超过国外观测的数据。根据 117 份雷达回波照片的外形特征,梅雨锋云系亮带可分为两种类型:1)连续均匀的亮带。在 RHI 显示上,表现为一条完整的均匀的水平强回波带。亮带中无明显可辨的强区和弱区,各处厚度大体相等。这一类大约占梅雨锋云系亮带的 32%;2)不均匀的亮带。它包括下列两种情况:第一种是连续的亮带,但各处回波强度不均匀,有强区和弱区,或者各种回波厚度不等,有厚有薄。梅雨锋降水期间,这一种亮带比较多,约占 49%。第二种是由若干亮点构成的亮带,这些亮带水平排列在一条直线上,两亮点之间有明显的弱回波间隔。这一种比较少,约占 19%。综合分析的结果认为:1)梅雨锋暴雨常属于强积层混合云降水,即在大片层状云内嵌入比较强的积雨云降水;2)在大别山地区,由于地形影响,常有对流单体新生、发展,与大片积层混合云降水回波合并后,常造成较大局地降水。这是强积层混合云降水

持续发展的一个重要因素;3)强积层混合云降水的降雨量多、雨强大。这与周围层状云持续不断地向积雨云供应水汽和小水滴有关。所以强积层混合云中积雨云单体生命史比较长,降水时间比较长,雨强比较大;4)强积层混合云降水中,在层状云的融化层以上,10 lgZ 随高度下降而线性陡增。这与嵌入的积雨云对层状云的自然“播撒”作用是分不开的(李子华等,1986d)。

1.3 冰雹微结构及形成的物理机制研究

王鹏飞发表的“冰雹移动规律初探”(中央气象局,1973),对冰雹移向和天气形势、山区地形、平原地貌等的关系作了探讨,从原理上阐述冰雹移动及发展动向,对理解雹云移向的变化及防雹活动,有较大的参考价值。王鹏飞和李子华发表的《巨淞形成机制的探讨》《大雹乎?巨淞矣——一种罕见的天气现象》和《再论巨淞的形成》三文(王鹏飞和李子华,1980,1982a,1982b),提出了一种罕见的气象现象(巨淞),解决了内蒙古、山西、东北等地山谷出现巨大冰块的来源及形成机理,指出巨淞与大雹在形成及结构上的区别。

为研究冰雹和人工增雨,李子华教授组织了包括雷达、探空、闪电等项目的综合观测,并注意收集雹块和雨滴谱样品,事后进行实验室分析。1975—1978年的4a中,李子华等在内蒙古林西地区雷达观测到33次冰雹过程,虽然其中超级单体雹云只有4次,占12%。但超级单体的危害很大,4a中林西地区雹灾面积63万亩中由超级单体雹云至灾的就有54万亩,占这个地区全部雹灾面积的85%。李子华等着重分析了林西地区的3次超级单体雹云的雷达资料、探空资料以及其他常规气象观测资料,并讨论了影响它发展的动力条件和先兆过程(李子华,1981)。普查了1976—1977年6—9月出现的115块雷暴单体,其中降雹回波36块、非雹云回波79块。对每块回波单体的外形结构特征、回波顶高度及回波顶高度处的环境温度、强回波高度及强回波顶处的环境温度、回波厚度、负温区厚度、正温区厚度及它们的比值、最大反射率因子等进行了分析和统计。结果表明,回波外形结构特征、回波顶高度、强回波高度、负温区厚度和最大反射率因子等五个因子比较好。它们具备相互独立、与雹云回波相关性好的条件。因此,确定了雹云回波的具体指标。在对许多冰雹云的观测后,李子华等(1979)发现许多有别于雷雨云的特征,从而提出了雷达识别冰雹云的综合指标方法。

1981年5月1日,长江下游地区出现一次罕见的雹暴和龙卷,使苏皖两省20多个县遭受风、雹袭击,被破坏的庄稼有175万亩,房屋68372间,1304人受伤,17人死亡。李子华和王鹏飞立即带队前往调查。1977级大气物理班学生郑国光在李子华指导下,做了不同大小的冰雹样品,用气球带入秧田上空,做下落实验,研究雹块与洞的大小之间的关系,定量分析了雹块大小与环境温度、含水量及垂直气流速度等关系,讨论了雹块增长的特征,由地面雹块微结构的分析推论其生长条件,得到雹云内一定的信息(李子华等,1984,1986e);实验室对冰雹样品做了切片分析。由此开始,郑国光在王鹏飞先生和李子华指导下,研制出了当时国内第一个用于碰冻增长实验的风洞装置,并进一步讨论了微物理参数与碰冻生长条件之间的关系,丰富了利用自然雹块微物理结构研究其生长过程的资料,有助于科学地认识冰雹的生长过程。1985年,“雹云雹谱及雹块微结构研究”获江苏省人民政府科学技术奖。当时任国家局云雾所所长的郭恩铭认为,这是迄今为止,国内最完整、系列的研究,尤其是对圆锥形冰雹块的空气动力学特征及其增长过程的研究,与国外相比,独具特色,有所创新。1988年,“圆锥形冰雹微结构及其理论和实验研究”获江苏省人民政府科学技术进步三等奖。

2 冰冻雨雪与电线积冰研究

2008年冬季,我国南方连续发生了4次持续性冰冻雨雪天气,高压输电线路因积冰中断,造成了巨大经济损失。为了研究持续性冰冻雨雪天气的成因,科技部下达了由湖北省气象局主持的国家科技支撑计划项目“南方冰雪灾害天气监测预警评估技术研究”,我校牛生杰团队承担第一课题“南方冰冻雨雪天气野外观测试验研究”。在观测电线积冰形成气象条件的同时,增加了雾滴谱、雨滴谱及通量等物理观测;进行了传统的积冰架观测和高压输电线路上架设四要素自动气象站及拉力器等的积冰实时观测。金沙、恩施2009年初路面温度和气象条件的变化特征显示,较高的地面和空气湿度、低于0℃的路面温度和弱风力促进了路面积冰(李蕊等,2011)。Zhou et al.(2012)采用湖北实际高压线路积冰观测资料研究了实际线路覆冰的气象条件,发现实际线路的表面温度高于环境温度,因此在接近0℃的气温下不会产生积冰,实际开始产生积冰的气温约为-2℃。研究还发现,云雾含水量较高时对

应冰厚增长速度较快,二者相关系数达 0.62 (Niu et al., 2012)。混合致冰条件下冰累积机制更为复杂,例如冻雾中混合出现冻毛毛雨,则冻毛毛雨通过两种方式影响积冰,一种是直接贡献冰增长,另一种是通过影响雾滴谱来间接贡献冰增长 (Zhou et al., 2013)。以此为基础,牛生杰教授研究团队延用湖北实际线路积冰观测资料分别研究了两次积冰个例的气象要素,发现积冰易出现在风速低于 2 m/s、南风风向、湿度超过 90%、气温低于 0 °C 的环境条件下 (刘丹和牛生杰, 2015; 刘雪静和牛生杰, 2016)。项目建立了电线积冰、道路积冰和地面积雪预报的物理模型并投入业务使用。改善后的积冰预报模型对于冻雨、湿雪和过冷雾影响下积冰厚度的预报均更符合实际 (Wang et al., 2019)。

3 关于大气冰核的研究

大气冰核浓度和时空分布对云降水物理过程及云的辐射气候效应具有重要影响,但总体上我国在此方面的影响比较弱,特别在我国南方地区,大气冰核观测几乎为空白。为此,银燕团队自主搭建了真空静力水汽扩散室 (苏航等, 2014) 和大气冰核高压静电采样器,分别在南京 (杨磊等, 2013a, 2013b; 高任杰等, 2017)、黄山不同高度 (Jiang et al., 2014, 2015)、泰山 (Jiang et al., 2020; Chen et al., 2021)、新疆 (Jiang et al., 2016) 以及河北 (He et al., 2021) 等地区进行了地面、高山以及飞机采样观测,取得了大量的宝贵资料。研究发现:大气冰核浓度随实验温度的降低、过饱和度的增加而呈增加的趋势;南京地区大气冰核浓度的日变化特征与大气中颗粒物的生成和清除过程有关,降水过程对冰核清除作用明显,并且在台风过程中冰核浓度增加;黄山不同高度的冰核观测结果表明大气冰核浓度随高度的增加而减小,春秋季节冰核浓度高于夏季,是由于夏季较多的雨水对大气中颗粒物的冲刷作用;新疆地区沙尘天气过程中观测到的大气冰核浓度比平时要高出 1 到 2 个量级,并且通过不同粒径段气溶胶粒子数浓度与大气冰核的相关性分析,发现大于 0.5 μm 的气溶胶粒子更容易充当冰核;通过飞机在不同高度的采样观测研究发现,冰核浓度在相同高度层内也有着较大的变化,但总的来说,冰核浓度随高度的升高呈递减的趋势;粒径大于 0.5 μm 的气溶胶粒子的活化率随着高度的升高而增大,意味着在较高的高度采到的大粒子具有更好的成冰活性;通过大量的外场观测资料,团队改进了大气冰核参数化方案,并

应用到 WRF 模式中研究不同的云凝结核和冰核浓度在冰雹演化过程中的各自作用 (Chen et al., 2019; Liu et al., 2021)。研究发现冰核数量的增加几乎不影响暖化过程,但导致冰晶浓度的增大和 Bergeron 过程的增强。研究得到 3 项国家自然科学基金项目 (包括国家基金重大项目课题 1 项)、1 项高等学校博士学科点专项科研基金和 1 项中国气象局局校共建项目的资助,项目成果获批 4 项国家发明专利,发表高水平论文数十篇。

4 气溶胶-云降水相互作用及其对区域气候的影响

气溶胶-云降水相互作用及其辐射气候效应是近三十年来国际大气科学领域的研究热点,也是气候变化评估中最不确定的因子。银燕教授团队发展和运用分档气溶胶-云微物理模式,探讨了沙尘气溶胶对不同干燥程度大气环境下的混合性对流云形成和发展物理过程的可能影响,获得了扬沙和沙尘暴天气条件下云微物理结构、光学特性以及降水形成对气溶胶变化的响应机制,揭示了沙尘气溶胶输送过程中在不同大气背景环境条件下对云内冰相粒子形成、发展和降水过程的影响 (Yin and Chen, 2007)。更进一步,他们探讨了沙尘气溶胶作为云凝结核 (CCN) 和大气冰核 (IN) 对我国新疆一次冰雹云发展的影响,结果发现,当沙尘作为 CCN 参与云的发展时,会促进冰雹降水,而当沙尘作为有效的 IN 时,会抑制冰雹发展 (Chen et al., 2019)。

系统地研究了气溶胶对地形云微物理结构和降水的影响。在单组分气溶胶绝热气块分档云模式基础上,银燕团队发展了多种化学组分气溶胶的绝热气块分档云模式,结合 2011 年 6—7 月在黄山取得的气溶胶和云微物理参数观测资料以及同时期气溶胶离子成分数据对对流云进行了数值模拟,获得了多化学组分气溶胶对暖云微物理特征的影响,揭示了气溶胶颗粒物浓度和尺度分布对云微物理特性和降水的影响特征。他们的结果证实了在气溶胶谱一定时,不同天气形势影响下,气溶胶的化学组分随尺度分布不同,对气块的最大过饱和度和气溶胶临界过饱和度产生不同的影响,进而活化出不同云滴数浓度和云滴谱 (秦彦硕等, 2012)。进一步将分档云微物理方案耦合到中尺度 WRF 模式,研究发现,当气溶胶作为云凝结核时,随着初始气溶胶浓度背景从清洁大陆背景变化到污染背景,地形降水增加 10%,并且降水区域向下游方向移动。在污染背景

下,有更多气溶胶活化成小云滴,这些小云滴主要集中在直径 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 范围内,抑制大液滴形成,从而导致降水延迟。另外,淞附过程和贝吉隆过程在污染背景下变得更加有效,促进冰相粒子增长,而且冰相粒子的增长反过来促进淞附过程。大量 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 小液滴被上升气流输送到冻结层以上,促进淞附过程和贝吉隆过程,从而促进冰相粒子增长,最终融化成大于 $100\ \mu\text{m}$ 的液滴,尤其是大于 $400\ \mu\text{m}$ 的液滴。这些大粒径液滴促进液滴间碰并过程,从而增强降水 (Xiao et al., 2014, 2015)。

还通过分析 CO 、 O_3 、 NO 、 NO_x 的飞机探测资料,揭示深对流云对污染物的垂直输送特征和深对流系统的一些重要宏观特征 (银燕等, 2010); 利用区域气候模式模拟研究了黑碳气溶胶和沙尘气溶胶对我国区域气候的影响 (陈丽和银燕, 2008; 张靖和银燕, 2008; Guo and Yin, 2015)。部分研究成果被评为江苏省 2013 年度科技成果三等奖。

5 云中起电、放电机制及雷击过程电磁辐射特征与耦合机制的研究

大气电学作为大气物理的一个重要方向,雷电物理则是大气电学的重要主题。2008 年大气物理学院成立以来,学院雷电物理研究取得了较快的发展,得益于闪电探测和计算机技术的不断进步,用于研究雷电物理相关领域的观测资料和模拟水平的不断提高。学者们对雷电的电磁效应、雷电物理特征和结构、雷电形成的规律和机制、雷电与云降水等天气气候变化过程的相互作用等相关问题进行了深入研究,并取得了一系列成果。

雷电作为一种电磁干扰源,其强大的瞬态电磁辐射环境一直是雷电物理、雷电探测、以及电磁兼容等领域关注的焦点。多项研究表明雷电电磁场测量的准确性不仅受地面电导率和土壤色散效应的影响,也会受到山地的高低起伏特征的影响,这会利用闪电辐射的电磁场特性来遥测雷电的放电参数带来不必要的误差,进而给雷电流放电参数的反演、地闪的强度和落点位置等方面带有很大的不确定性。Zhang et al. (2012a, 2012b, 2012c, 2012d) 通过考虑地表面雷电电磁波传播路径的复杂性、电离层底层参数的各向异性,建立了雷电电磁波在地球-电离层波导中传播的二维和三维时域有限差分算法,系统性地研究了多频段、多尺度雷电电磁场传播规律,以及对流层大气和中高层大气之间的电动力耦合效应,为广域雷电探测技术和雷电放电参数的遥感等

方面的发展奠定了基础。主要研究工作包括:

1) 对雷电电磁传输近似算法的推广和检验 (Zhang et al., 2012a, 2012b)。基于观测事实中雷电流和闪电通道的传输特征,利用多尺度坐标系下的 FDTD 方法建立了三种典型地表电导率复杂分层结构下的雷电电磁传输模型,并对光滑地表在复杂电导率分层情况下的雷电电磁场传输特性进行分析,最后基于上述模型对 Wait 算法在近距离内进行推广和检验,并提出适用于光滑海-陆交界混合路径下的新算法。

2) 基于粗糙分形地表的雷电电磁传播特性研究 (Zhang et al., 2012c, 2012d, 2013)。基于现代分形理论将地表的高低起伏特征加入 FDTD 雷电电磁模型研究之中,建立粗糙分形地表下的雷电电磁传输模型,然后分别对粗糙分形陆地和粗糙分形海面下的雷电电磁场的传输特征进行分析,提出适用于粗糙有限电导率地表和粗糙海-陆交界地表下的雷电电磁理论近似新算法,最后利用 FDTD 模型结果对其适用精度和范围进行检验。

3) 研究了山体和地球曲率对雷电 LF 频段地波传播的影响 (Zhang et al., 2014a; Hou et al., 2019)。当雷击山顶时,由于雷电电磁波在山脚处的反射作用,使得远距离垂直电场和水平磁场增强,山体越高越陡,增强越显著。传播路径上高度小于 $1\ \text{km}$ 的山体对远场的影响可以近似忽略;而当山体高度大于 $1\ \text{km}$ 时,山体的影响比较显著。当观测距离小于 $200\ \text{km}$ 时,地球曲率的影响可以忽略。考虑土壤电导率和地球曲率的影响时,远场峰值与理想地面情况下 (电导率无限大,平坦地面) 的比值近似以指数形式衰减。当雷电电磁波沿海面传播时,传播距离每增加 $100\ \text{km}$,电磁波到达观测点的时间和峰值点时间分别延迟 $0.1\ \mu\text{s}$ 和 $0.64\ \mu\text{s}$;而雷电电磁波沿陆地表面传播时,传播距离每增加 $100\ \text{km}$,电磁波到达观测点的时间和峰值点时间分别延迟 $0.36\ \text{ms}$ 和 $0.96\ \text{ms}$ 。

4) 研究了雷电电磁波在电离层 D 层中激发的感应电流密度的时空演变特征,基于二次辐射理论,解释了一次天波的极性反转现象以及向西传播时的“双峰”现象 (Hou et al., 2020)。利用高速摄谱仪获得的闪电回击、连续电流和 M 分量的高时间分辨光谱,分析揭示了闪电光谱特征与放电特征之间的相关性,以及放电通道内部结构与辐射光谱的对应关系,并阐释了回击通道在峰值电流时的有关物理特性。

不过由于观测实验无法全面呈现整个雷暴云过

程细节,因此雷暴云内电过程与动力、热力和微物理过程之间的关系一直是大气电学领域的研究难点。而随着电子计算机性能的提高,利用数值模拟方法研究雷暴云微物理发展、起电和放电过程成为可能。雷暴云的动力-电耦合数值模拟有助于进一步认识雷暴中起电和放电的特征及本质。随着起电机制实验室研究的发展,大量的感应和非感应起电参数化方案被提出。很多研究者开始尝试在云模式中加入各种起电机制的参数化方案,模拟雷暴云内电荷的产生、分布及电场变化的演变特征。郭凤霞等(2010)在三维强风暴动力-电耦合数值模式中对比较分析了不同起电参数化方案对雷暴云电荷结构的影响。Shi et al.(2015)利用二维高分辨率雷暴云起放电模式讨论了不同相态水成物粒子之间的感应起电过程对雷暴云电过程的作用。随着不同的起电机制方案的提出和发展,数值模拟工作通过模拟得到了与实际观测结果相似的最大电场强度、电场垂直廓线以及空间电荷结构。因此,进一步分析雷暴云动力和微物理过程与电活动之间的相互关系成为了可能。在此基础上,大量研究揭示了温湿层结、中底层风速、气溶胶等环境因子影响雷暴云动力、微物理及电过程的物理原因(郭凤霞等,2004,2014; Shi et al.,2015; Zhao et al.,2015; Tan et al.,2017; Shi et al.,2020)。随着对雷暴云内起电活动认识的深入,科学家们发现如果不引进合理的放电过程,只能模拟第一次闪电发生前的云内电特征,而不能模拟闪电发生后雷暴云内的电特征,因此研究和引入合理的放电参数化方案是完善雷暴云电过程数值模拟的基本要求。Tan et al.(2006a,2006b)发展了二维高分辨率的双向随机放电模型,阐明了空间电荷分布对各种类型闪电发生和发展的影响规律(Tan et al.,2012,2014; Guo et al.,2016)。此外,Tan et al.(2019)在观测的基础上,提出了上行闪电放电参数化方案,实现了在现有的雷暴云模型中模拟上行闪电放电。

6 关于大气边界层物理的研究

高志球课题组针对不同下垫面的边界层特征进行了大量观测,包括城区和郊区边界层,农田边界层、极地边界层和水体边界层等(Liu et al.,2020),认清了其中与边界层相关物理参量的特性,并依据观测对边界层中相关算法进行了改进,包括土壤热通量算法(Gao et al.,2017)、边界层高度算法(Zhang et al.,2014b)和表面层通量算法(Li et al.,

2014);改进后的算法被世界主流大气数值模式所采用(如中国的 BCC 模式和美国的 WRF 模式)。高志球教授课题组还针对大气污染-大气边界层相互作用进行了深入研究,认清了大气污染状况下的大气边界层特征,并解析了大气边界层对大气污染的作用机制(Wang et al.,2019)。

7 人工影响天气理论与技术研究

南京信息工程大学前身南京气象学院的开拓者之一——王鹏飞先生,在大气物理学和天气导变学(人工影响天气学)方面的研究成果,在国内外享有盛名,是我国现代大气物理学研究开拓者之一。20 世纪 60 年代,王鹏飞首先表示“气态直接凝为固态”的术语“凝华”一词,不仅在气象学界,而且成为我国广大科学工作者普遍使用的,作为自然科学各学科共用词汇。王鹏飞和李子华编撰的《微观云物理学》(气象出版社,1989)全面细致且透彻地阐述了云雾降水中微物理过程及原理,填补了我国在这方面的空白。

李子华在内蒙古林西县组织和指挥过 5 a 的人工防雹试验,明显减少了该县的雹灾损失,为此辽宁省政府授予“在气象科技工作中取得优异成绩”奖。在此期间,提出雷达识别冰雹云的综合指标方法,在全国得到广泛应用,并被编入多种雷达气象教材。以后又参加安徽巢湖、贵州威宁、河南南阳、辽宁沈阳等地的人工影响天气试验,为防灾减灾做出了贡献。

2005 年,牛生杰获批国家自然科学基金重点项目“层状云降水物理过程及其人工催化物理效应的观测研究”。该项目通过飞机观测,获得了华北地区云雾的微物理参数,并通过观测资料对人工催化过程中层状云微观粒子的演变特征、可播性性以及潜力区进行了讨论(杨文霞等,2005;封秋娟等,2007;王元等,2017)。吴香华等(2015)利用统计模拟方法“bootstrap”分析自然降水变异及其对人工增雨效果评估的影响,研究表明可以通过增加催化样本量、删除异常点和选取降水结构相似的对比单元等三种方法来控制自然降水变异的影响;催化样本量越大,自然降水变异的影响和催化效果的检出下限越小,并且人工增雨作业的效果和降水量大小没有直接联系,而其波动幅度随着降水量增加而逐渐越小。刘晓莉等(2006)利用数值模式对人工催化对层状云微物理的影响做了分析,发现模式云被催化后,云中过冷水在 200 min 表现出恢复趋势,云中

水汽对过冷水的恢复过程做出了贡献;在过冷水较多的区域播撒液态二氧化碳可以取得较好的催化效率。这些研究直接获得了层状云微物理特征并观测到了人工催化前后云微物理特征的变化,这为人工影响天气业务开展和理论研究都提供了宝贵的支撑和资料。与辽宁省合作在沈阳、鞍山开展了“东北冷涡天气系统人工增雨技术”的研究,该研究成果被收入《东北冷涡云物理及导变技术》。

银燕科研团队一致致力于云微物理过程的研究,自2010年以来通过数值模拟,对人工催化对云的微物理垂直结构、水汽的垂直分布、降水形成的影响等方面做了一系列的工作(Wang et al., 2013; Chen and Yin, 2014; 刘佩等, 2019)。王黎俊等(2013)通过对三江源地区一次人工增雨作业前后的微物理参数分析,提出了一个针对该地区的人工增雨作业量化指标。刘佩等(2019)通过数值模拟试验讨论了在不同阶段播撒吸湿性核对流云降水的影响,研究发现在云的发展阶段早期播撒能起到更好的减雨效果,播撒时间越早对大粒子生长过程的抑制作用越强,且随着播撒剂量的增加,减效果更加显著,甚至能达到消雨的效果。通过三维云模式讨论了人工播撒对水汽冲破对流层顶对平流层的输送的影响,发现通过播撒适量的人工冰核,能够影响到水汽对平流层的输送,这将对的气候存在着潜在的影响(Chen and Yin, 2014)。同时,团队也结合实际人工播撒试验,对气候变化下人工防雹效果检验等课题进行了探讨(王黎俊等, 2012)。这一系列的研究成果推动了我们人工催化理论的认识,也

为人工影响天气试验的设计提供了理论指导。

2014年夏季,南京承办“第二届青年夏季奥林匹克运动会”。开、闭幕式均有降雨,我校李子华被江苏省气象局聘为人工消减雨专家组组长,银燕为专家组成员。参与指挥了人工消减雨工作。获得了减雨效果,保障了开、闭幕式正常运行。银燕参加国庆70周年人工影响天气保障,受到中央军委的表彰。在2008年召开的中国人影响天气事业50周年纪念大会上,李子华被中国气象学会表彰为“开创和发展我国人工影响天气工作做出突出贡献的专家”。2019年我校大气物理学院被评为全国人工影响天气先进单位,同时,银燕被评为全国人工影响天气先进个人。

8 结语

大气物理学是南京信息工程大学(原南京气象学院)1960年建校以来设置的几个主要专业(方向)之一。在过去的60a,培养了一大批享誉国内外的高级业务、科研和管理人才,在科学研究方面完成了一批国家级重要研究项目,特别是在云雾降水物理与人工影响天气、大气气溶胶的理化特性及其环境气候效应等方面,取得了一大批具有重要影响力的创新性成果。云雾降水物理学是大气物理学重要的研究内容之一,也是灾害性天气预报、气候变化和环境变化研究的重要内容,其研究成果对中国地区大气水循环和淡水资源的影响研究具有重要的科学意义和社会现实意义。

参考文献(References)

- Chen B J, Yin Y, 2014. Can we modify stratospheric water vapor by deliberate cloud seeding? [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 119(3): 1406-1418. doi: 10.1002/2013JD020707.
- Chen K, Yin Y, Liu S X, et al., 2021. Concentration and variability of deposition-mode ice nucleating particles from Mt Tai of China in the early summer [J]. *Atmos Res*, 253: 105426. doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105426.
- 陈丽, 银燕, 2008. 矿物气溶胶远程传输过程中的吸收增温效应对云和降水的影响 [J]. *高原气象*, 27(3): 628-636. Chen L, Yin Y, 2008. Numerical simulations for the thermal impact of the long-Rang transport of mineral aerosols [J]. *Plateau Meteor*, 27(3): 628-636. (in Chinese).
- Chen Q, Yin Y, Jiang H, et al., 2019. The roles of mineral dust as cloud condensation nuclei and ice nuclei during the evolution of a hail storm [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 124(24): 14262-14284. doi: 10.1029/2019JD031403.
- 封秋娟, 牛生杰, 雷恒池, 等, 2007. 吉林省一次层状云降水宏微观特征的观测研究 [J]. *南京气象学院学报*, 30(6): 770-778. Feng Q J, Niu S J, Lei H C, et al., 2007. A study on the microphysical characteristics of the precipitable stratiform cloud in Jilin Province [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 30(6): 770-778. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.2007.06.005. (in Chinese).
- 高任杰, 银燕, 蒋惠, 等, 2017. 亚青会期间南京地区大气冰核的观测分析 [J]. *气象科学*, 37(2): 141-150. Gao R J, Yin Y, Jiang H, et al., 2017. Measurement analysis of atmospheric ice nuclei in Nanjing during the Asian Youth Games [J]. *J Meteorol Sci*, 37(2): 141-150. (in Chinese).
- 郭凤霞, 张义军, 言穆弘, 等, 2004. 环境温湿度层结对雷暴云空间电荷结构的影响 [J]. *高原气象*, 23(5): 678-683. Guo F X, Zhang Y J, Yan M H, et al., 2004. The effect of environment temperature and humidity stratification on charge structure in thunderstorms [J]. *Plateau Meteor*, 23(5): 678-683. (in Chinese).

- 郭凤霞,张义军,言穆弘,2010.雷暴云首次放电前两种非感应起电参数化方案的比较[J].大气科学,34(2):361-373. Guo F X,Zhang Y J,Yan M H,2010.Comparison of two parameterization schemes for noninductive mechanism before the first discharge in a simulated single cell storm [J].Chin J Atmos Sci,34(2):361-373.(in Chinese).
- 郭凤霞,刘冰,白翎,等,2014.中低层水平风速对闪电和降水影响的数值模拟[J].高原气象,33(4):1135-1145. Guo F X,Liu B,Bai L,et al., 2014.Numerical simulation study on the effect of middle-and low-level horizontal wind speed on lightning and precipitation[J].Plateau Meteor, 33(4):1135-1145.(in Chinese).
- Guo F X,Lu G Y,Wu X,et al.,2016.Occurrence conditions of positive cloud-to-ground flashes in severe thunderstorms[J].Sci China Earth Sci,59 (7):1401-1413.doi:10.1007/s11430-016-5279-7.
- Guo J,Yin Y,2015.Mineral dust impacts on regional precipitation and summer circulation in East Asia using a regional coupled climate system model [J].J Geophys Res:Atmos,120(19):10378-10398.doi:10.1002/2015JD023096.
- Gao Z Q,Tong B,Horton R,et al.,2017.Determination of desert soil apparent thermal diffusivity using a conduction-convection algorithm[J].J Geophys Res:Atmos,122(18):9569-9578.doi:10.1002/2017JD027290.
- He C,Yin Y,Wang W Y,et al.,2021.Aircraft observations of ice nucleating particles over the Northern China Plain;two cases studies[J].Atmos Res, 248:105242.doi:10.1016/j.atmosres.2020.105242.
- Hou W H,Zhang Q L,Wang L,et al.,2019.Effect of striking a cone-shaped mountain top on the far lightning-radiated electromagnetic field[J].IEEE Trans Electromagn Compat,61(4):1147-1156.doi:10.1109/TEM.2018.2843772.
- Hou W H,Azadifar M,Rubinstein M,et al.,2020.The polarity reversal of lightning-generated sky wave[J].J Geophys Res:Atmos,125(17): e2020JD032448.doi:10.1029/2020JD032448.
- Jiang H,Yin Y,Yang L,et al.,2014.The characteristics of atmospheric ice nuclei measured at different altitudes in the Huangshan Mountains in South-east China[J].Adv Atmos Sci,31(2):396-406.doi:10.1007/s00376-013-3048-5.
- Jiang H,Yin Y,Su H,et al.,2015.The characteristics of atmospheric ice nuclei measured at the top of Huangshan (the Yellow Mountains) in Southeast China using a newly built static vacuum water vapor diffusion chamber[J].Atmos Res,153:200-208.doi:10.1016/j.atmosres.2014.08.015.
- Jiang H,Yin Y,Wang X,et al.,2016.The measurement and parameterization of ice nucleating particles in different backgrounds of China[J].Atmos Res,181:72-80.doi:10.1016/j.atmosres.2016.06.013.
- Jiang H,Yin Y,Chen K,et al.,2020.The measurement of ice nucleating particles at Tai'an City in East China[J].Atmos Res,232:104684.doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104684.
- 李蕊,牛生杰,汪玲玲,等,2011.三种下垫面温度对比观测及结冰气象条件分析[J].气象,37(3):325-333. Li R,Niu S J,Wang L L,et al.,2011. Comparison of three kinds of underlying surface temperatures and analysis of the road icing meteorological conditions[J].Meteor Mon,37(3): 325-333.(in Chinese).
- Li Y,Gao Z,Li D,et al.,2014.An improved non-iterative surface layer flux scheme for atmospheric stable stratification conditions[J].Geosci Model Dev,7(2):515-529.doi:10.5194/gmd-7-515-2014.
- 李子华,1981.超单体雹云结构和特征的某些观测结果[J].南京气象学院学报,4(1):74-82. Li Z H,1981.Some observational evidences of the structure and features of supercell hailstorms[J].J Nanjing Inst Meteor,4(1):74-82.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.1981.01.009.(in Chinese).
- 李子华,2001.中国近 40 年来雾的研究[J].气象学报,59(5):616-624. Li Z H,2001.Studies of fog in China over the past 40 years[J].Acta Meteorol Sin,59(5):616-624.(in Chinese).
- 李子华,2014.李子华云雾物理文选[M].北京:气象出版社. Li Z H,2014.Selected works of Li Zihua on cloud physics[M].Beijing:China Meteorological Press.(in Chinese).
- 李子华,宫福久,徐书田,等,1979.雷达识别冰雹云的综合指标方法[J].大气科学,3(4):385-387. Li Z H,Gong F J,Xu S T,et al.,1979.A method of using synthetic index for identifying hail-cloud with radar.[J].Chin J Atmos Sci,3(4):385-387.(in Chinese).
- 李子华,宋乃会,章澄昌,等,1984.长江下游地区一次超单体降雹的切片分析[J].南京气象学院学报,7(1):75-81. Li Z H,Song N H,Zhang C C,et al.,1984.An analysis of hailstone slices from the supercell over the lower Yangtze[J].J Nanjing Inst Meteor,7(1):75-81.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.1984.01.008.(in Chinese).
- 李子华,周文贤,章澄昌,等,1986a.江淮地区梅雨锋降水回波特征[C]//中国南方云物理学和人工降水论文集.北京:气象出版社:55-59. Li Z H,Zhou W X,Zhang C C,et al.,1986a.Echo characteristics of Meiyu front precipitation in Jianghuai Region[C]//The paper reels of cloud physics and artificial precipitation in southern China.Beijing:China Meteorological Press:55-59.(in Chinese).
- 李子华,章澄昌,周文贤,等,1986b.强积层混合云降水特征的分析[C]//中国南方云物理学和人工降水论文集.北京:气象出版社:60-65. Li Z H,Zhou W X,Zhang C C,et al.,1986b.An analysis of precipitation characteristics of mixed clouds in the cumulus [C]//The paper reels of cloud physics and artificial precipitation in southern China.Beijing:China Meteorological Press:60-65.(in Chinese).
- 李子华,张克杰,张维全,1986c.一次梅雨锋降水结构及暴雨中心的形成机制[J].南京气象学院学报,9(3):283-290. Li Z H,Zhang K J,Zhang W Q,1986c.Precipitation structure of a Meiyu front and formation mechanism of rainstorm center [J].J Nanjing Inst Meteor,9(3):283-290.doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.1986.03.009.(in Chinese).
- 李子华,夏晓青,章晴,等,1986d.梅雨锋云系亮带的初步研究[J].气象科学,6(1):82-90. Li Z H,Xia X Q,Zhang Q,et al.,1986d.A preliminary

- study of the bright band in the Meiyu frontal cloud system[J].Sci Meteorol Sin,6(1):82-90.(in Chinese).
- 李子华,郑国光,陈飞,1986e.圆锥形冰雹下落末速度的实验研究[J].南京气象学院学报,9(4):366-375. Li Z H,Zheng G G,Chen F,1986e. Experimental study of terminal velocity of free-falling conical hailstones[J].J Nanjing Inst Meteor,9(4):366-375.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.1986.04.006.(in Chinese).
- Liu C,Gao Z,Yang Q,et al.,2020.Measurements of turbulence transfer in the near-surface layer over the Antarctic sea ice surface from April through November in 2016[J].Ann Glaciol,61(82):12-23.
- 刘丹,牛生杰,2015.两次电线积冰过程气象条件实时观测研究[J].大气科学学报,38(3):428-432. Liu D,Niu S J,2015.Observational study on real-time meteorological conditions during two wire icing processes[J].Trans Atmos Sci,38(3):428-432.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130313001.(in Chinese).
- Liu D Y,Yang J,Niu S J,et al.,2011.On the evolution and structure of a radiation fog event in Nanjing[J].Adv Atmos Sci,28(1):223-237.doi:10.1007/s00376-010-0017-0.
- 刘佩,银燕,陈倩,等,2019.吸湿性播撒对暖性对流云减雨影响的数值模拟[J].应用气象学报,30(2):211-222. Liu P,Yin Y,Chen Q,et al.,2019.Numerical simulation of hygroscopic seeding effects on warm convective clouds and rainfall reduction[J].J Appl Meteor Sci,30(2):211-222.(in Chinese).
- Liu S X,Yin Y,Xiao H,et al.,2021.The effects of ice nucleation on the microphysical processes and precipitation for a heavy rainfall event in Beijing[J].Atmos Res,253:105476.doi:10.1016/j.atmosres.2021.105476.
- 刘晓莉,牛生杰,陈跃,2006.层状云催化后过冷水分布与演变规律的数值模拟[J].大气科学,30(4):561-569. Liu X L,Niu S J,Chen Y,2006. Numerical simulation of distribution and evolution of supercooled liquid water in seeding stratiform cloud[J].Chin J Atmos Sci,30(4):561-569.(in Chinese).
- 刘雪静,牛生杰,2016.两次高压电线积冰过程气象成因分析[J].气象科学,36(2):230-235. Liu X J,Niu S J,2016.Analysis of the causes for two high-voltage wire icing cases[J].J Meteor Sci,36(2):230-235.(in Chinese).
- 陆春松,牛生杰,杨军,等,2010.南京冬季一次雾过程宏观微结构的突变特征及成因分析[J].大气科学,34(4):681-690. Lu C S,Niu S J,Yang J,et al.,2010.Jump features and causes of macro and microphysical structures of a winter fog in Nanjing[J].Chin J Atmos Sci,34(4):681-690.(in Chinese).
- 陆春松,牛生杰,岳平,等,2011.南京冬季雾多发期边界层结构观测分析[J].大气科学学报,34(1):58-65. Lu C S,Niu S J,Yue P,et al.,2011. Observational research on boundary layer structure during high incidence period of winter fog in Nanjing[J].Trans Atmos Sci,34(1):58-65.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2011.01.008.(in Chinese).
- 牛生杰,2014.雾物理化学研究[M].北京:气象出版社. Niu S J,2014.Study on physical chemistry of fog[M].Beijing:China Meteorological Press.(in Chinese).
- Niu S J,Lu C S,Yu H Y,et al.,2010a.Fog research in China:an overview[J].Adv Atmos Sci,27(3):639-662.doi:10.1007/s00376-009-8174-8.
- Niu S J,Lu C S,Liu Y G,et al.,2010b.Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet spectrometer:a case study[J].Adv Atmos Sci,27(6):1259-1275.doi:10.1007/s00376-010-8192-6.
- Niu S J,Zhou Y,Jia R,et al.,2012.The microphysics of ice accretion on wires:observations and simulations[J].Sci China Earth Sci,55(3):428-437.doi:10.1007/s11430-011-4325-8.
- 牛生杰,陆春松,吕晶晶,等,2016.近年来中国雾研究进展[J].气象科技进展,6(2):6-19. Niu S J,Lu C S,L J J,et al.,2016.Advances in fog research in China[J].Adv Meteorol Sci Technol,6(2):6-19.doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2016.02.001.(in Chinese).
- 秦彦硕,银燕,杨素英,等,2012.黄山地区春夏季气溶胶离子组分及其对云微物理特征的影响[J].气象学报,70(6):1334-1346. Qin Y S,Yin Y,Yang S Y,et al.,2012.Chemical characteristics of the aerosols and their effect on microphysical properties of clouds in spring and summer over Mt.Huang[J].Acta Meteorol Sin,70(6):1334-1346.(in Chinese).
- Shi Z,Tan Y B,Tang H Q,et al.,2015.Aerosol effect on the land-ocean contrast in thunderstorm electrification and lightning frequency[J].Atmos Res,164/165:131-141.doi:10.1016/j.atmosres.2015.05.006.
- Shi Z,Wang H C,Tan Y B,et al.,2020.Influence of aerosols on lightning activities in central eastern parts of China[J].Atmos Sci Lett,21(2):e957.doi:10.1002/asl.957.
- 苏航,银燕,陆春松,等,2014.新型扩散云室搭建及其对黄山地区大气冰核的观测研究[J].大气科学,38(2):386-398. Su H,Yin Y,Lu C S,et al.,2014.Development of new diffusion cloud chamber type and its observation study of ice nuclei in the Huangshan area[J].Chin J Atmos Sci,38(2):386-398.doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12211.(in Chinese).
- Tan Y B,Tao S C,Zhu B Y,et al.,2006a.Numerical simulations of the bi-level and branched structure of intracloud lightning flashes[J].Sci China Ser D,49(6):661-672.doi:10.1007/s11430-006-0661-5.
- Tan Y B,Tao S C,Zhu B Y,2006b.Fine-resolution simulation of the channel structures and propagation features of intracloud lightning[J].Geophys Res Lett,33(9):L09809.doi:10.1029/2005GL025523.
- Tan Y B,Shi Z,Wang N N,et al.,2012.Numerical simulation of the effects of randomness and characteristics of electrical environment on ground strike location of cloud-to-ground lightning[J].Chinese J Geophys,55(6):626-634.doi:10.1002/cjg2.1757.

- Tan Y B, Tao S C, Liang Z W, et al., 2014. Numerical study on relationship between lightning types and distribution of space charge and electric potential [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 119(2): 1003-1014. doi:10. 1002/2013JD019983.
- Tan Y B, Shi Z, Chen Z L, et al., 2017. A numerical study of aerosol effects on electrification of thunderstorms [J]. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 154: 236-247. doi:10. 1016/j. jastp. 2015. 11. 006.
- Tan Y B, Zheng T X, Shi Z, 2019. Improved lightning model: application to discuss the characteristics of upward lightning [J]. *Atmos Res*, 217: 63-72. doi:10. 1016/j. atmosres. 2018. 10. 011.
- Wang L J, Yin Y, Yao Z Y, et al., 2013. Microphysical responses to catalysis during a stratocumulus aircraft seeding experiment over the Sanjiangyuan region of China [J]. *Acta Meteorol Sin*, 27(6): 849-867. doi:10. 1007/s13351-013-0609-6.
- 王黎俊, 银燕, 郭三刚, 等, 2012. 基于气候变化背景下的人工防雹效果统计检验: 以青海省东部农业区为例 [J]. *大气科学学报*, 35(5): 524-532.
- Wang L J, Yin Y, Guo S G, et al., 2012. A statistics evaluation of hail suppression effect under the background of climate change: a case study of east agricultural region in Qinghai Province [J]. *Trans Atmos Sci*, 35(5): 524-532. doi:10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 2012. 05. 001. (in Chinese).
- 王黎俊, 姚展予, 等, 2013. 三江源地区秋季一次层积云飞机人工增雨催化试验的微物理响应 [J]. *气象学报*, 71(5): 925-939. Wang L J, Yin Y, Yao Z Y, et al., 2013. Microphysical responses as seen in a stratocumulus aircraft seeding experiment in autumn over the Sanjiangyuan National Nature Reserve [J]. *Acta Meteorol Sin*, 71(5): 925-939. (in Chinese).
- Wang L L, Liu J K, Gao Z Q, et al., 2019. Vertical observations of the atmospheric boundary layer structure over Beijing urban area during air pollution episodes [J]. *Atmos Chem Phys*, 19(10): 6949-6967. doi:10. 5194/acp-19-6949-2019.
- 王鹏飞, 李子华, 1980. “巨淞”形成机制的探讨 [J]. *南京气象学院学报*, 3(1): 1-6. Wang P F, Li Z H, 1980. On the formation mechanism of “Big hail” [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 3(1): 1-6. doi:10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 1980. 01. 001. (in Chinese).
- 王鹏飞, 李子华, 1982a. “大雹乎”? “巨淞也”!: 一种新的罕见天气现象 [J]. *气象*, 8(2): 20-22. Wang P F, Li Z H, 1982 “Big hail”? “Giant song”: a new rare weather phenomenon [J]. *Meteor Mon*, 8(2): 20-22. (in Chinese).
- 王鹏飞, 李子华, 1982b. 再论巨淞的形成 [J]. *气象*, 8(6): 15-16. Wang P F, Li Z H, 1982. *Meteorological Monthly*, 8(6): 15-16. (in Chinese).
- Wang T S, Niu S J, Lü J J, et al., 2019. Observation and simulation studies of three types of wire icing [J]. *Atmos*, 10(5): 234.
- 王元, 牛生杰, 雷恒池, 2017. 利用三架飞机联合探测资料分析层积混合云催化物理效应 [J]. *大气科学学报*, 40(5): 686-696. Wang Y, Niu S J, Lei H C, 2017. An examination of the microphysical responses to aircraft seeding of stratiform clouds with embedded convection using the joint observational data of three aircrafts [J]. *Trans Atmos Sci*, 40(5): 686-696. doi:10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20161012002. (in Chinese).
- 吴香华, 牛生杰, 金德镇, 等, 2015. 自然降水变异对人工增雨效果评估的影响 [J]. *中国科学: 地球科学*, 45(7): 1011-1019. Wu X H, Niu S J, Jin D Z, et al., 2015. Influence of natural rainfall variability on the evaluation of artificial precipitation enhancement [J]. *Sci China (Ser D)*, 45(7): 1011-1019. (in Chinese).
- Xiao H, Yin Y, Jin L J, et al., 2014. Simulation of aerosol effects on orographic clouds and precipitation using WRF model with a detailed Bin microphysics scheme [J]. *Atmos Sci Lett*, 15(2): 134-139. doi:10. 1002/asl2. 480.
- Xiao H, Yin Y, Jin L J, et al., 2015. Simulation of the effects of aerosol on mixed-phase orographic clouds using the WRF model with a detailed Bin microphysics scheme [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 120(16): 8345-8358. doi:10. 1002/2014JD022988.
- 杨磊, 银燕, 杨绍忠, 等, 2013a. 南京地区冬季大气冰核特征及其与气溶胶关系的研究 [J]. *大气科学*, 37(5): 983-993. Yang L, Yin Y, Yang S Z, et al., 2013. Characteristics of atmospheric ice nuclei and its relationship to aerosols in winter in Nanjing [J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(5): 983-993. (in Chinese).
- 杨磊, 银燕, 杨绍忠, 等, 2013b. 南京地区大气冰核浓度的测量及分析 [J]. *大气科学*, 37(3): 579-594. Yang L, Yin Y, Yang S Z, et al., 2013. Measurement and analysis of atmospheric ice nuclei in Nanjing [J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(3): 579-594. (in Chinese).
- 杨文霞, 牛生杰, 魏俊国, 等, 2005. 河北省层状云降水系统微物理结构的飞机观测研究 [J]. *高原气象*, 24(1): 84-90. Yang W X, Niu S J, Wei J G, et al., 2005. Airborne observation for microphysical structure of Precipitation System of stratiform cloud in Hebei Province [J]. *Plateau Meteor*, 24(1): 84-90. (in Chinese).
- Yin Y, Chen L, 2007. The effects of heating by transported dust layers on cloud and precipitation: a numerical study [J]. *Atmos Chem Phys*, 7(13): 3497-3505. doi:10. 5194/acp-7-3497-2007.
- 银燕, 曲平, 金莲姬, 等, 2010. 热带深对流云对 CO、NO、NO_x 和 O₃ 的垂直输送作用 [J]. *大气科学*, 34(5): 925-936. Yin Y, Qu P, Jin L J, et al., 2010. Vertical transport of CO, NO, NO_x, and O₃ by tropical deep convective clouds [J]. *Chin J Atmos Sci*, 34(5): 925-936. (in Chinese).
- 张靖, 银燕, 2008. 黑碳气溶胶对我国区域气候影响的数值模拟 [J]. *南京气象学院学报*, 31(6): 852-859. Zhang J, Yin Y, 2008. Numerical simulations of effect of black carbon aerosol on regional climate in China [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 31(6): 852-859. doi:10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 2008. 06. 018. (in Chinese).
- Zhang Q L, Li D S, Fan Y F, et al., 2012a. Examination of the Cooray-Rubinstein (C-R) formula for a mixed propagation path by using FDTD [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 117(D15): D15309. doi:10. 1029/2011JD017331.
- Zhang Q L, Li D S, Zhang Y Y, et al., 2012b. On the accuracy of wait's formula along a mixed propagation path within 1 km from the lightning channel [J]. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 54(5): 1042-1047. doi:10. 1109/TEM. 2012. 2190765.
- Zhang Q L, Yang J, Li D S, et al., 2012c. Propagation effects of a fractal rough ocean surface on the vertical electric field generated by lightning return

- strokes[J]. J Electrostat, 70(1): 54-59. doi: 10. 1016/j. elstat. 2011. 10. 003.
- Zhang Q L, Jing X Q, Yang J, et al., 2012d. Numerical simulation of the lightning electromagnetic fields along a rough and ocean-land mixed propagation path[J]. J Geophys Res: Atmos, 117(D20): D20304. doi: 10. 1029/2012JD017851.
- Zhang Q L, Li D S, Tang X, et al., 2013. Lightning-radiated horizontal electric field over a rough-and ocean-land mixed propagation path[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 55(4): 733-738. doi: 10. 1109/TEM. 2012. 2235444.
- Zhang Q L, Hou W H, Ji T T, et al., 2014a. Validation and revision of far-field-current relationship for the lightning strike to electrically short objects[J]. J Atmos Sol-Terr Phys, 120: 41-50. doi: 10. 1016/j. jastp. 2014. 08. 015.
- Zhang Y, Gao Z, Li D, et al., 2014b. On the computation of planetary boundary-layer height using the bulk Richardson number method[J]. Geosci Model Dev, 7(6): 2599-2611. doi: 10. 5194/gmd-7-2599-2014.
- 赵丽娟, 牛生杰, 2012. 近地层辐射过程与雾微结构的相互作用特征[J]. 大气科学学报, 35(6): 673-679. Zhao L J, Niu S J, 2012. Characteristics of interactions between radiation processes and fog microphysical structure[J]. Trans Atmos Sci, 35(6): 673-679. doi: 10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 2012. 06. 008. (in Chinese).
- Zhao P G, Yin Y, Xiao H, 2015. The effects of aerosol on development of thunderstorm electrification; a numerical study[J]. Atmos Res, 153: 376-391. doi: 10. 1016/j. atmosres. 2014. 09. 011.
- 中央气象局, 1973. 全国人工降水、防雹座谈会报告选稿[M]. 北京: 气象出版社. Central Meteorological Bureau, 1973. Selected draft of report of National Symposium on artificial precipitation and hail prevention[M]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese).
- Zhou Y, Niu S J, Lü J, et al., 2012. Meteorological conditions of ice accretion based on real-time observation of high voltage transmission line[J]. Chin Sci Bull, 57(7): 812-818. doi: 10. 1007/s11434-011-4868-2.
- Zhou Y, Niu S J, Lü J, 2013. The influence of freezing drizzle on wire icing during freezing fog events[J]. Adv Atmos Sci, 30(4): 1053-1069. doi: 10. 1007/s00376-012-2030-y.

Advances in selected subjects of atmospheric physics in Nanjing University of Information Science and Technology (NUIST) during her 60 years of development

YIN Yan, LI Zihua, DIAO Yiwei, ZHU Bin, NIU Shengjie, MA Gelan, LU Chunsong, ZHANG Qilin, GUO Fengxia, LI Yubin, CHEN Jinghua, LIU Xiaoli, JIANG Hui, SHI Zheng, HOU Xuewei, KANG Hanqing

School of Atmospheric Physics/Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

This paper reviews the advances on selected subjects of atmospheric physics in Nanjing University of Information Science and Technology (NUIST) during her 60 years of development, including the physical and chemical properties and microphysical structure of cloud and fog, the microphysical mechanisms of hail formation, the mechanisms of wire icing, the theory and practice of weather modification, the physical and chemical properties of atmospheric aerosols and their influence on cloud and precipitation, the atmospheric boundary layer physics, and the atmospheric electrical processes.

atmospheric physics; cumulus imbedded in stratiform clouds; hailstone; ice nucleus; aerosol-cloud interaction

doi: 10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20201208001

(责任编辑: 袁东敏)