

郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 2013. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008~2012 年)[J]. 大气科学, 37 (2): 351–363, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12321. Guo Xueliang, Fu Danhong, Hu Zhaoxia. 2013. Progress in cloud physics, precipitation, and weather modification during 2008–2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 351–363.

云降水物理与人工影响天气研究进展(2008~2012 年)

郭学良¹ 付丹红² 胡朝霞²

¹ 中国气象科学研究院, 北京 100081

² 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 本文回顾和总结了近 5 年(2008~2012 年)云降水物理与人工影响天气主要研究进展, 并讨论了目前存在的主要问题和亟待解决的关键科学问题。内容涉及可分辨云数值模式及模拟研究、云降水的观测与遥感反演研究、气溶胶对云降水的影响及人工影响天气相关的数值模式、观测试验研究等。提高对云降水形成过程、时空结构与演变机理的深入认识, 对揭示大气水循环、气候变化过程, 提高天气精细化预报、大气云水资源开发利用及气象防灾减灾的能力, 具有十分重要的作用。

关键词 云降水物理 人工影响天气 进展综述

文章编号 1006-9895(2013)02-0351-13

中图分类号 P481

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12321

Progress in Cloud Physics, Precipitation, and Weather Modification during 2008–2012

GUO Xueliang¹, FU Danhong², and HU Zhaoxia²

¹ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract In this paper, major progresses in the studies of cloud physics and precipitation as well as weather modification during 2008–2012 have been reviewed and summarized; the important scientific issues that need to be solved urgently in the future have also been discussed. This paper reviews the current status of the advances in cloud-resolving models and simulation studies, observational studies on remote retrieval of cloud and precipitation, influences of aerosol on cloud and precipitation, and modeling and measurement of weather modification processes. Cloud and precipitation play critical roles in the atmospheric water cycle, climate change, weather forecasting, and reduction of atmospheric water resource exploitation and meteorological disasters. Therefore, it is important to improve our understanding of the formation, temporal and spatial structure, and evolution of cloud and precipitation.

Keywords Advances, Cloud physics, Weather modification

1 引言

云物理学是研究云产生、发展和降水形成的物理过程的学科, 在了解降水产生过程、气候变化, 以及提高天气预报的精细化水平及人工影响天气

能力等方面具有至关重要的作用, 也是目前亟待加深理解和认识的重要领域。

有关云物理与人工影响天气的相关进展已有一些综述性文章发表, 如云降水微物理及室内实验

收稿日期 2012-11-12, 2012-12-25 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41005072、40575003, 国家科技支撑计划重点项目 2006BAC12B03

作者简介 郭学良, 男, 1964 年出生, 研究员, 研究方向: 云降水物理与人工影响天气。E-mail: guoxl@mail.iap.ac.cn

方面 (Rogers and DeMott, 1991; Pruppacher and Klett, 1997), 云数值模式在人工影响天气方面的应用研究 (Orville, 1996) 以及人工影响天气理论、播撒技术等方面 (Cotton, 1986; Brientjes, 1999; Silverman, 2001; NRC, 2003; Garstang et al., 2004; List, 2004)。我国有关云物理与人工影响天气进展也有不少综述性论文发表 (黄美元等, 2000, 2003; 毛节泰和郑国光, 2006; 姚展予, 2006; Ma et al., 2007; 雷恒池等, 2008; Guo and Zheng, 2009)。这些综述性论文比较系统地对 2008 年以前国内外云降水物理及人工影响天气的现状、存在的问题及发展趋势进行了深入的讨论和论述。有关气溶胶对云降水的研究也有一些综述性论文 (段婧和毛节泰, 2008; 杨慧玲等, 2011)。最近郑国光和郭学良 (2012) 对人工影响天气科学技术现状进行了综述。

随着云数值模式、观测技术的快速发展, 云降水物理与人工影响天气领域也取得了一系列新进展。本文将着重对 2008~2012 年期间有关云降水物理与人工影响天气领域的主要研究进展进行简要综述, 并讨论目前存在的主要问题及亟待解决的关键科学问题。

2 云降水物理研究进展

2.1 云数值模式及模拟研究

云模式近几年的进展主要体现在中尺度可分辨云模式以及具有更详细云微物理过程的云数值模式的不断发展和模拟应用研究等方面。模式的初始场和边界条件更为接近实际, 如在模式模拟中普遍采用了非均匀中尺度气象场、高分辨率的地形和陆面过程。云物理过程中已经开始包含了气溶胶核化过程, 部分还考虑了气溶胶形成的化学过程。

2.1.1 气溶胶对云雾和降水的影响

气溶胶是云异质核化过程中最基本的要素。自然云的形成主要依赖异质核化过程, 因此气溶胶对云降水过程具有重要影响。气溶胶的云核化过程受气溶胶尺度、化学组成、物理特性以及云中过饱和度等多种因素的影响。由于不同尺度、化学组成的气溶胶粒子的核化需要的过饱和度不同, 在目前的数值模式中, 是通过预报和诊断过饱和度确定气溶胶核化的数量。气溶胶对云和降水的影响机理非常复杂, 具有较大的不确定性。具有气溶胶核化过程的云模式是研究这一问题的重要手段。

岳治国等 (2011) 利用双参数显式云方案的

WRF 模式, 对北京地区暴雨、中雨和微量降水等 3 次云降水过程进行了数值模拟研究。结果表明, 随着气溶胶浓度的增加, 北京地区的暴雨、中雨和微量降水平均累计降水量分别减少了 23.8%, 16.6% 和 14%。而且气溶胶浓度的增加, 还可改变降水的强度、分布和时间。在我国一些地区的观测分析研究中也发现气溶胶对降水有减小作用 (戴进等, 2008)。

肖辉和银燕 (2011) 利用耦合 Morrison 双参数物理方案的 WRF 中尺度数值模式对 2007 年 6 月 13 日山西一次强降水过程进行了模拟研究, 表明污染背景下的降水区域无明显变化, 但中心强度变强, 平均降水量减小 0.8%。

房文和郑国光 (2011) 利用改进的中尺度模式 (MM5) 中的暖云方案, 研究了暖云降水中巨核的作用。结果表明, 巨核具有增强雨滴的凝结、碰并和云雨自动转化过程的作用, 使得云滴数减少高达 40%, 云水减少达 20%, 云滴有效半径增加高达 30% 左右。在污染和清洁环境下巨核均可增加降水。

董昊等 (2012) 利用 WRF 模式模拟研究了不同云微物理方案云凝结核 (CCN) 对飑线降水的影响, 得到所有模拟试验均出现 CCN 浓度增加延迟降水产生、初期降水减弱的情况, 但在模拟后期降水量也随着 CCN 浓度增加而减小, 而飑线成熟阶段 CCN 对降水的影响更加复杂。

贾星灿和郭学良 (2012) 利用 WRF/Chem 模式和雾的观测资料, 开展了包含和不包含人为污染排放源两种大气背景条件下的数值模拟对比试验。试验结果表明, 在考虑污染排放源时, 模式模拟的雾的空间分布和强度变化与卫星、能见度仪和微波辐射计的观测更为接近。污染条件下的边界层结构更有利于雾的形成, 人为大气污染物使雾的范围最大增加 50%, 雾的强度最大增加 5 倍, 平均延长雾持续时间 1.5 h。并且污染气体 SO_2 、 NO_x 和 NH_3 的排放产生的二次气溶胶对雾的形成和发展具有重要影响 (Jia and Guo, 2012)。

2.1.2 MCS 产生机理的数值模拟

中尺度对流系统 (MCS) 的产生机理非常复杂, 受大尺度天气系统、地形以及复杂的热力、动力过程的影响。中尺度可分辨云模式的发展, 在地形、云物理过程、辐射过程等方面的描述更趋合理, 显著提高了对 MCS 形成和演变的模拟能力, 有利于模拟研究 MCS 形成过程 (积云并合、地形影响等) 及其产生的降水、冰雹、雷电、大风等灾害性天气

过程。

积云并合过程是 MCS 形成的重要过程之一, 过去有关积云并合的 MCS 形成研究一般采用理想数值模拟试验, 侧重机理研究。理想积云并合的数值模拟研究一般采用理想地形、均匀初始场和人为初始扰动等假设, 结果很难与实际积云并合形成过程进行比较。Fu and Guo (2006, 2012) 利用包含北京实际地形的可分辨云数值模式 MM5 模拟研究了北京 2001 年 8 月 23 日一次 MCS 的形成过程, 发现 MCS 的形成经历了从单体并合到积云团并合, 再到 MCS 内部的强中心并合等多个尺度并合过程, 积云并合过程通过低、中层强迫作用, 明显改变了云动力、微物理特性, 伴随并合过程有强降水、雷电、大风等灾害性天气过程产生, 有关模拟的并合过程与雷达观测结果具有很好的一致性, 提高了对积云并合过程的深入认识。

翟菁等 (2012) 利用 MM5 中尺度模式对 2008 年 7 月 22 日发生在安徽等地的一次强对流天气过程中对流云合并现象进行了数值模拟研究, 认为对流云合并过程可引起回波增强, 云顶抬高, 云水, 冰相物质含量增加, 地面降水增加现象。吕玉环等 (2012) 利用 WRF 模式对 2005 年 5 月 5 日发生在贵阳的一次云并合过程进行模拟, 表明积云并合过程使区域平均降水量总体呈增加趋势。这些数值模拟研究结果也与雷达观测结果有较好的一致性。

由此可见, 中尺度可分辨云模式的发展也提高了对伴随云形成的降水、大风、冰雹和雷电等现象的模拟能力。所有这些云模式的发展, 已经使云数值模式从过去的理想条件数值模拟 (如人为对流启动、均匀初始场等) 向更接近实际的云数值模拟转变 (如非均匀初始场、实际地形等), 这种转变也使得数值模拟结果与实际观测结果的比较成为可能。特别是星载云卫星观测技术 (Cloudsat, TRMM 等)、机载探测技术和地基遥感探测技术的快速发展, 使云模式微物理过程的检验也成为可能。中尺度可分辨云模式的应用, 在云微物理过程对降水的影响方面有了新的认识, 如云物理过程对降水的影响不仅仅取决于云微物理过程本身, 也与大气辐射过程密切相关 (Fu et al., 2011)。

刘香娥和郭学良 (2012) 利用可分辨云中尺度 WRF 数值模式, 研究了 2009 年 6 月 3 日我国河南发生的历史罕见强飚线天气过程, 发现雨水蒸发过程是影响地面冷池强度的关键因素, 而地面强冷池

在此次飚线灾害性大风的产生中具有重要作用, 另一个决定性作用是中高层动量下传。由动量下传造成的地面灾害性大风约占 70%, 而地面强冷池导致的地面大风约占 30%, 二者共同作用导致了此次飚线灾害性大风的产生 (Liu and Guo, 2012)。

2.1.3 云结构与降水过程的数值模拟

对云结构的深入了解, 有利于提高对降水形成机理的认识, 是云降水物理研究的基础。云模式的发展和不断完善, 对云结构和降水过程的认识进一步提高。

赵震和雷恒池 (2008) 利用 MM5 中增加的双参数显式云物理方案模拟了西北地区一次层状云降水过程, 模拟结果显示对小雨的预报评分较高, 对中雨以上评分低而且位置有一定偏差, 即对层状云降水模拟效果较好, 并探讨了层状云降水形成机制。

杨洁帆等 (2010) 利用一维层状云分档模式, 对 2007 年 7 月 1 日吉林省一次锋面抬升引起的层状云降水结构进行了模拟研究, 表明冰晶层对混合层的播撒以直径 $D < 300 \mu\text{m}$ 的小冰晶粒子为主。从混合层播撒 $D > 100 \mu\text{m}$ 的水滴粒子以及未完全融化的冰晶粒子对暖层中小云滴粒子的碰并收集作用较强, 同时, 一部分降水粒子在暖层内可通过随机碰并机制产生。

陶玥等 (2012) 利用中尺度云分辨模式对我国南方 2008 年 1 月 28~29 日的冻雨天气过程进行了数值模拟, 研究了冰冻天气形成的大气层结及云系冻雨区云的宏微观结构特征。结果表明, 湖南和贵州两地冻雨形成的云物理机理不同, 湖南冻雨在“冷—暖—冷”层结下, 通过“冰相融化过程”形成, 而贵州冻雨是在“暖—冷”层结下通过“过冷暖雨过程”形成的。

侯团结等 (2011) 利用一维层状云模式, 对吉林 2004 年 7 月 1 日的一次降水性层状云宏微观物理结构和降水机制进行了分析, 对顾震潮三层云结构模型有了进一步的认识。云体发展成熟时, 各层之间存在播种—供应关系。

周非非等 (2010) 对 2002 年 10 月 18~20 日河南省层状云系的水分收支和降水机制用 MM5 模式模拟的结果表明, 在主要降水时段, 降水是由冷云和暖云过程共同产生的, 冰粒子凝华增长对雨水的贡献最大超过 35%, 撞冻增长的贡献最高不足 12%, 可见水汽对降水粒子增长很重要。催化层、

冰水混合层和液水层对降水的贡献分别约为 15%~27%、45%~50%和 23%~38%，表明此“催化—供给”云中冰粒子在冰水混合层的生长对降水的贡献相当大。

最近几年部分云数值模式中还考虑了雷达资料同化过程，开展了雷达资料同化对云降水过程的影响（徐枝芳等，2009；兰伟仁等，2010a，2010b；陈明轩等，2012）。模拟试验结果表明，雷达资料同化可有效改善反射率、降水和云物理过程的模拟效果。

2.1.4 雾数值模拟

雾数值模式是雾形成和预报研究的重要手段。随着复杂可分辨云中尺度数值模式的发展，考虑了更为详细的云物理过程、边界层过程、湍流过程和辐射过程等，对雾生消过程以及形成机理的模拟研究提供了有效手段，同时为将来雾的数值预报和人工消雾提供了重要条件。

何晖等（2009）利用中尺度可分辨云数值模式（MM5）研究了 2007 年 10 月 26 日北京大雾天气过程，并与多通道微波辐射计、风廓线仪及 NOAA 极轨卫星监测资料进行了对比研究，研究发现地面长波辐射冷却及雾顶的长波辐射冷却降温对雾的形成和维持具有重要作用，而太阳的短波辐射对雾的减弱消散有重要影响。

胡朝霞等（2011）利用中尺度数值模式对 2004 年 12 月 17~19 日在我国中东部地区出现的大雾天气进行了数值模拟研究。结果表明，此次雾过程是一次典型的辐射雾，覆盖范围大，水平不均匀。近地面存在的逆温层、充沛的水汽供应和微风条件有利于雾的形成和维持。

何晖等（2011）利用中尺度数值模式（MM5）的 Reisner2 方案中引入了液氮与云相互作用的过程，实现了播撒消雾功能。对 2007 年 12 月 26 日北京地区的一次冷雾天气过程进行了消雾的数值模拟研究，探讨了消雾的效果和机理。结果表明，以 15 g/s 的速率播撒作业和在目标区上风方 5~6 km 的地点作业对能见度的改善最为显著。

2.1.5 云与闪电过程的数值模拟研究

云中的电过程与云微物理、动力过程密切相关。随着云模式的不断完善，有利于对云中电过程的模拟研究，揭示云微物理与电过程相互作用的机理。

侯团结等（2009）将三种不同的非感应起电参

数化方案引入三维强风暴云数值模式，对 2005 年 6 月 10 日发生在长春的一次雹暴过程进行了模拟研究。结果表明，电荷的产生始于过冷水含量中心，并随着过冷水含量中心的向上发展而上移。非感应起电参数化方案的差异会导致不同的云中电荷极性结构。

周志敏和郭学良（2009a）建立了云物理耦合电过程的冰粒子分档模式，对北京一次强雷暴天气的云中空间电荷结构分布、形成机制及放电过程进行了模拟分析研究。结果表明，云水含量主要通过感应起电过程影响云水、霰粒子之间的电荷转移，然后影响空间电荷分布；微物理过程的不均匀性使感应、非感应起电变得更加复杂；强上升气流将冰相物携带到较高处，从而使得水成物间发生电荷转移的高度也比较高；由于放电会改变空间电荷结构，放电通道中的感应电荷会重新分配到各个水成物表面。

周志敏和郭学良（2009b）利用建立的三维闪电数值模式，模拟研究了北京 2001 年 8 月 23 日一次强雷暴发展过程中的云内闪电通道特征及其与上升气流和液水含量（LWC）之间的关系。结果发现：在强雷暴发展过程中，由于雪晶往往在上升气流相对较弱及 LWC 较低的地方形成、发展，与霰粒子之间的非感应起电过程首先发生在这些区域，然后发生电荷分离。

周志敏等（2011）利用建立的耦合电过程三维冰粒子分档模式，模拟研究了北京一次强雷暴发展过程中电过程对霰粒子含量、数浓度的影响。结果发现，直径较小的霰粒子数浓度受电场影响较大，直径较大的霰粒子数浓度受电场影响较小；对不同直径的霰粒子来说，电过程既有可能使其数浓度增加，又有可能使其数浓度减少；当电场较大时，电过程对小直径霰粒子的影响比较直接，而对大直径霰粒子具有间接的影响。

2.2 云降水观测与遥感反演研究

云结构的形成、演变是降水相关研究的基础。最近几年我国在云主动探测和被动遥感探测研究方面取得了明显进展，特别在地基雷达探测（云雷达、偏振雷达等）、机载探测和卫星遥感探测等方面取得了明显的进步。

2.2.1 雷达探测研究

雷达，特别是云雷达、偏振雷达等在云降水结构和演变的观测中具有十分重要的作用。毫米波云

雷达具有波长短 (3 mm 或 8 mm)、灵敏度、分辨率高 (小于 50 m) 的特点。主要缺点是易被液态水衰减, 探测范围有限。由于不需要大的天线和强大功率的发射机就可以实现对弱信号目标的探测, 获取良好、详细的信息, 由于其重量轻, 可以方便地装载在地面移动、飞机、卫星等观测平台上, 最近几年在我国也在相关的研制和应用方面得到较快的发展。

章文星和吕达仁 (2012) 利用 2008 年 5~12 月在安徽省寿县进行的大气辐射综合观测试验资料, 比较研究了云雷达 (W-band, 95 GHz)、云高仪 (Vaisala Ceilometer) 及扫描式全天空红外成像仪 (SIRIS-1 型) 三种云观测仪器的观测结果, 结果显示, 地基热红外对于观测中低云高具有稳定、可靠、经济和便捷等优势, 但观测结果较云雷达系统偏高。彭亮等 (2012) 利用 2008 年 11 月 1 日寿县气象站云雷达测量, 开展了云内空气垂直速度的反演试验。结果显示, 小粒子示踪法在湍流较弱时能比较精确地反演空气垂直速度, 而湍流较强时, 湍流造成的误差不可忽略。

偏振雷达的最大作用是可分辨云中水成物的种类, 获得更精确的降水测量。最近几年我国偏振雷达的研制及相关研究方面有了较快的发展 (何宇翔等, 2009, 2010)。

房彬等 (2010) 利用激光雨滴谱仪观测到的滴谱资料建立实时的 $Z-I$ 关系。然后, 利用变分法对同时有雷达回波和雨量计资料的点的实测校准因子进行校准, 获得最优校准因子分析场。最后, 对有雨量计的点取雨量计实际观测值, 没有雨量计的点利用最优校准因子分析场估算降水。利用此方法对辽宁省 2007 年 5 月 15 日一次天气过程进行降水量估算, 结果表明, 雷达—雨量计—粒子激光探测仪联合校准法结合了雨量站观测资料单点精度高和雷达资料时空分辨率高的优点, 提高了降水量的估算精度, 更好地反映了降水的空间分布。

2.2.2 机载探测研究

机载云探测设备包括机载微波辐射计、机载云雷达和机载云粒子测量系统等。我国在机载微波辐射计和机载云雷达方面目前还处于研究和试验阶段。

周珺等 (2008) 采用一维层状云模式产生云样本, 通过统计回归方法获取机载微波辐射计测量路径积分液态水含量的反演系数, 结果表明, 由于考

虑了对层状云物理过程, 在一定程度上减小了因背景大气条件、云温、云内含水量的垂直分布等的不确定性所引起的反演误差, 可使反演精度得到进一步改善。

周珺等 (2010) 通过对正则化方法改进和数值模拟试验, 开展了机载双天线微波辐射计观测数据层析反演云液水空间分布的试验, 得到反演误差在 8.6%~12.3% 之间, 反演图像可以反映出不同云型的结构特征。

机载云粒子探测系统主要采用进口机载粒子测量系统, 是基于激光拍摄粒子图像和对粒子记数的粒子谱测量系统。由多个探头组成, 分别装在飞机的不同部位, 可以覆盖 0.1 μm 到几个毫米的云粒子尺度范围, 包括气溶胶、非降水性云粒子、降水性云粒子。飞机探测是云探测重要的手段, 但受观测条件的限制较大。范烨等 (2010) 分析研究了北京及周边地区 2004 年 8~9 月期间三次锋面云系的机载云粒子测量系统 (PMS) 的观测资料。结果表明, 三次降水云系以直径 5~9 μm 、200 μm 和 400~1000 μm 的云和降水粒子为主。并建立了云粒子谱分布拟合函数。冷锋层积云系的负温云层中存在着相同浓度量级的过冷云水和雨水、霰粒、柱状和针状冰晶, 过冷水含量可达到 0.26 g/m^3 , 暖锋云系中则以霰粒、结凇粒子和冰雪晶聚合体为主, 也存在少量柱状、针状冰晶和过冷水滴。

张佃国等 (2011) 利用山东省 1989~2008 年 23 架次秋季降水云系飞机探测资料, 分析了云中过冷水以及冰晶浓度的分布特征。结果表明, 山东省降水云系中存在较为丰富的过冷水, 最大可达 0.36 g/m^3 , 云中冰晶浓度最大可达 12.8~406 L^{-1} 。

赵增亮等 (2011) 对 1999 年 6 月 4 日华北平原上一次层积云过程两个架次的飞机微物理探测资料进行了分析, 并将飞机盘旋上升和下降取得的 5 次云参数垂直探测结果作为辐射传输模式 SBDART2.4 的输入, 采取正演的方式与 GMS5/VISSR、NOAA15/AVHRR 反射通道的资料进行了对比分析。飞机探测显示层积云云厚约 1000 m, 云粒子浓度最大值 425 cm^{-3} , 含水量最大值 0.2 g/m^3 。

卢广献和郭学良 (2012) 利用 2009 年春季开展的“环北京云观测试验”气溶胶和云凝结核 (CCN) 数据, 分析研究了试验期间大气气溶胶的分布、来源特征及其与 CCN 的转化关系。结果表明, 高浓度气溶胶基本分布在 4500 m 以下的区域,

量级可以达到 10^3 cm^{-3} 。4500 m 以上气溶胶呈显著下降趋势, 仅为 10^1 cm^{-3} 的量级; 气溶胶平均直径在 $0.16 \sim 0.19 \mu\text{m}$ 之间。4500 m 以下气溶胶平均粒子谱呈双(多)峰分布, 而在 4500 m 以上基本为单峰分布。受气溶胶的来源特性差异的影响, 在 0.3% 的过饱和度下, 4500 m 以下气溶胶转化为 CCN 比例不到 20%, 但在 4500 m 以上可高达近 50%。气团移动轨迹显示, 4500 m 以上的大气高层均受到来自沙尘等较大尺度粒子的影响, 飞机观测的高 CCN 浓度说明这种较大尺度气溶胶粒子可溶性较大。而 4500 m 以下的低层, 由于受到局地或区域地面污染的影响, 气溶胶的尺度较小, 核化为 CCN 的过饱和度要求较高, 因此气溶胶到 CCN 的转化率较低。

2.2.3 星载探测资料分析研究

最近几年我国对星载微波、雷达、可见光、红外等云探测信息的分析研究有较大的发展, 卫星探测信息有利于更大范围和长时间尺度的云演变特征的研究。

李兴宇等(2008), Li et al. (2008) 利用 1984~2004 年国际卫星云气候学计划 (ISCCP) 的云水路径 (CWP) 资料, 分析了中国地区空中云水资源的分布特征、变化趋势以及与大气环流和湿度场的关系。该研究表明, 中国地区 CWP 的分布与大气环流、地形特征、大气湿度分布及水汽传输密切相关, 中国地区 CWP 存在明显的季节变化, 6 月全国平均 CWP 最高, 10 月最低, 不同地区季节变化差异明显。从变化趋势看, 中国地区 CWP 以增加为主, 青藏高原东部、内蒙古东部地区以及西北东部地区 CWP 的增加趋势较强。全国范围内, 冬季和秋季 CWP 增加较大, 春季和夏季增加较小。这些变化主要与大气环流变化导致的抬升运动的增强以及大气湿度(水汽)增加有关, 中国地区空中云水资源在全球变暖的背景下表现出增加的趋势, 符合气温增加导致水循环增强的观点。

CloudSat 是 2006 年发射的第一颗搭载毫米波段雷达的卫星, 可用于研究云垂直结构特征等。与 CALIPSO、Aqua 和 Aura 以及法国 Parasol 卫星一起组成 A-Train 卫星星座, 前后星时间差小于 30 min, 实现准同步主被动、多波段对地球的观测, 能够提供云垂直廓线及云中粒子的相关特性的信息。王帅辉等(2010)比较研究了 2006 年 7 月至 2007 年 6 月的 CloudSat 2B-GEOPROF-LIDAR 产品资料和国

际卫星云气候计划 (ISCCP) D2 月平均云量数据。结果表明, ISCCP 与 CloudSat 总云量的分布形势在午间和凌晨均具有较好的一致性, 但是两种资料得到的总云量在量值上存在一定差异。对于整个研究区域而言, 午间 ISCCP 较 CloudSat 平均总云量偏低 8.9%, 凌晨偏低 15.1%。ISCCP 与 CloudSat 云量差值总体上随 CloudSat 云量的增大而呈线性变化, 在 CloudSat 少云区 ISCCP 略有偏高, 而在多云区则显著偏低。

汪会等(2011)利用 2006 年 9 月至 2009 年 8 月的 CloudSat/CALIPSO 资料, 比较分析了东亚季风区、印度季风区、西北太平洋季风区和青藏高原地区的云量和云层垂直结构及其季节变化特征。提出现有大气环流模式需要提高垂直分辨率, 才能提高对云的分辨能力。

李俊等(2012)基于 CloudSat 卫星研究发现, 中尺度对流系统具有湿中性层结特征, 并且从动力学和热力学的角度探讨了湿中性层结结构在 MCS 发生和发展中所起到的作用。

杨大生和王普才(2012)利用 CloudSat 卫星资料, 分析了 2006~2008 年中国地区夏季月平均云水含量的垂直和区域变化特征。结果显示, 青藏高原地形和东亚夏季风对月平均云含水量分布有明显影响。中国中部纬度上对流层中层的月平均液态水含量比南部及北部的量值大, 各月平均云液水含量垂直廓线存在两个不同高度上的峰值区。

李香淑等(2011)利用热带测雨卫星 (TRMM) 的雷达 (PR)、微波成像仪 (TMI)、加密探空等综合观测资料, 研究了 1998 年 5~6 月中国南海季风试验 (SCSMEX) 期间南海北部中尺度对流云带的结构、演变和降水特征, 探讨了对流有效位能、风切变及相变潜热在对流云带维持和发展中的作用机理。结果表明, 季风爆发前南海北部地区尽管存在较大的对流有效位能, 但垂直风切变很小。季风爆发后, 季风环流使对流有效位能和垂直风切变加强和维持, 从而导致南海的对流云呈现维持和加强的态势, 可发展为深厚中尺度对流云, 降水加强。季风爆发期间对流发展产生的水分相变潜热加热率可增加 2 倍以上。卫星得到的云带变化特征与利用中国南海季风试验区 1998 年 5~6 月科学 1 号和实验 3 号观测船得到的一天 4 次加密探空资料分析得到的环流结构特征的演变一致(李香淑等, 2008)。季风爆发前, 南海北部地区高层辐合、低

层辐散, 以下沉气流为主; 季风爆发后, 在 200 hPa 左右高层辐散, 而在 900~950 hPa 左右低层辐合, 并出现强上升气流。这种动力场的显著变化引起温度、湿度场的改变, 直接导致南海对流的快速发展, 对流活动伴随着剧烈的热量和水汽垂直输送和转化。

方翔等 (2011) 研究了 NOAA 卫星微波湿度计 (AMSU-B) 的 3 个水汽吸收波段与冰粒子含量的变化, 建立了利用 NOAA 卫星 AM-SU-B 水汽通道反演对流云冰水路径和冰水厚度的算法, 得到的反演结果与闪电分布具有较好的一致性。其中, 强的负闪发生区与高层冰粒子聚集区对应较好, 而正闪和部分较弱负闪发生在中层冰粒子聚集区, 与星载微波成像仪 (TMI) 反演可降水冰结果有较好的一致性。

刘贵华等 (2011) 选取 2007 年 6 月 21 日陕西地形云降水过程, 用极轨卫星资料反演高空间分辨率的云微物理特征。分析表明: 迎风坡云顶亮温为 -31°C , 粒子有效半径为 $9\text{ }\mu\text{m}$, 含有丰富过冷水, 但缺乏冰晶; 对温度为 -20°C 的低云, 在有高云参与的情况下, 产生了较多的降水。

齐彦斌等 (2010) 利用 NCEP 资料, 将对流涡度矢量的垂直分量、水平散度和广义位温的垂直梯度结合在一起, 引入热力切变平流参数。研究结果表明热力切变平流参数能够比较准确地表征雨区上空水平风场切变和湿等熵面漏斗状向下伸展等动力学和热力学典型的垂直结构特征, 与降水系统的发展演变有密切的关系。

2.2.4 GPS 水汽测量及地基微波辐射计研究

大气水汽含量的三维空间分布和演变特征是研究对云降水形成机理的关键要素, 目前对大气水汽的测量主要有探空、GPS、微波辐射计等手段, 最近几年有关此方面的研究也有一些重要进展, 特别是 GPS、微波辐射计观测资料的验证和应用。

刘红燕等 (2009) 对比分析了地基微波辐射计、探空、GPS 测量水汽的差异, 得到地基微波辐射计与探空的差值为 0.281 cm , GPS 与探空的差值为 0.728 cm , 地基微波辐射计与 GPS 的差值为 0.322 cm 。并依据地基 12 通道微波辐射计测量的水汽总量 (简称 PWV), 分析了北京地区水汽在四个季节中的日变化特征。

梁宏等 (2012) 探讨了地基 GPS 遥感的大气水汽总量与探空观测的大气水汽总量的差别, 结果表

明, 近十多年拉萨站探空水汽总量比 GPS 水汽总量明显偏小, 偏小程度随使用不同的探空仪而异。

黄建平等 (2010) 利用两年的地基微波辐射计观测资料, 分析了黄土高原半干旱区液态云水路径和可降水量的变化特征。结果显示, 在黄土高原地区, 95% 的云水路径值都在 150 g/m^2 以下, 95% 的可降水量值都在 3 cm 以下。卫星反演资料的年变化趋势与地基反演结果比较吻合。

3 人工影响天气相关研究进展

数值模式在人工影响天气作业条件预报、识别、效果评估、作业方法的建立以及机理等方面的研究中具有重要作用。我国近几年在人工影响天气数值模式的发展和应用方面做了大量研究。中尺度可分辨云模式已经应用于人工影响天气的业务, 主要用于作业条件预报 (楼小凤等, 2012)。

在云尺度人工影响天气模式 (Guo et al., 2006; 2007) 的基础上, 方春刚等 (2009) 在 WRF 中尺度天气数值模式中引入碘化银与云相互作用过程, 建立了中尺度碘化银播撒数值模式, 研究了不同播撒部位、播撒时间和播撒剂量情况下碘化银的扩散、传输及其对云中水成物和降水量的影响。

杨洁帆和雷恒池 (2010) 使用包含详细微物理过程的一维层状云全分档模式, 加入 AgI 焰剂催化方案, 对 2007 年吉林省长春市一次层状云降水过程进行 AgI 播撒试验。

洪廷超和李宏宇 (2011) 利用观测资料、中尺度模式 MM5 和一维层状云模式, 分析和研究了典型层状云系的“催化—供给”云结构及其分布、降水形成微物理机制以及人工增雨条件。结果表明, 云系的不同部位, 其垂直结构不同。提出可以用云体“催化—供给”云结构、降水机制、过冷水含量、冰晶浓度、云的暖区含水量以及冰面过饱和和水汽量判断人工增雨催化条件。

最近几年我国也开展了一些吸湿剂播撒模式的研究。吸湿剂催化技术主要针对暖云区的催化技术, 通过使用具有吸湿特性、适当尺度的物质 (如盐粒等), 增加云中凝结核 (CCN) 或促进暖云和混合相云碰并降水形成过程。因此, 在吸湿剂播撒方面, 催化剂的尺度和吸湿特性是两个重要影响因素, 我国有关吸湿性催化剂性能及在暖云人工增雨中的应用研究还处于试验研究之中。一些数值模拟试验结果表明 (房文和郑国光, 2011), 大尺度气

溶胶核对促进降水形成具有重要影响。

一些先进探测和作业设备在人工影响天气中的应用呈现快速发展,如地基多普勒偏振雷达、机载探测仪器等。高时空分辨率的雷达、卫星、雨量站等资料可以较快速地通过专业或公共网络进入指挥平台。GPS 系统的应用可以使作业飞机的飞行状态与观测的云系状况紧密结合起来,大大提高了作业的时效性并降低了盲目性。

4 讨论与结论

对云降水形成关键物理过程的认识、验证和定量化描述仍然不足。尽管最近几年观测技术与云数值模式及应用研究有了长足的发展,对一些云降水形成的宏微观过程的基本认识有了显著的提高,但对云结构及降水形成的一些关键物理过程及形成机理的认识仍然十分不足,如云中水分转化的微物理、动力、热力过程以及云微物理与动力过程的相互作用等。由于缺乏相应的定量化观测和实验研究,云中相关的物理过程的假定无法得到检验和验证。目前普遍采用的多普勒降水雷达只能对云的降水回波结构和水平风场进行观测,对云中粒子相态、分布、转化及相应的动力、热力过程的观测几乎无法获得。而能获取云中粒子相态的相关技术,目前仍然处于不成熟状态。我们目前对云的认识,在很大程度上还处于定性化认识状态,定量化特别是准确的定量化描述仍然十分缺乏,云仍然是一个“黑匣子”。

云数值模式虽然可以在一定程度上揭示云中粒子的转化和相应的物理过程,但数值模式中的物理过程是基于理论、观测和实验建立的,存在大量的理论假定,如果这些假定和描述无法得到验证和检验,很难提高其模拟能力。目前对数值模式的验证大部分仍然采用雷达、地面降水的直接验证,但即使降水模拟效果不好,由于缺乏科学依据,也很难直接通过改进模式中的物理过程,提高降水的模拟能力,尽管大量的数值模拟敏感性试验表明,这些物理过程具有很重要作用。因此,提高对云中一些关键物理过程的认识,降低其不确定性,是提高云数值模拟能力的关键环节。

目前的计算机资源已经能够提供具有短期预报价值的云实际模拟能力,把具有详细云物理过程、具备资料同化功能的数值模式应用于人工影响天气的实际业务中已成为可能。特别是与人工影响

天气有关的各种微物理过程,在不断检验的基础上采纳和引入,可以降低人工影响天气工作的很多不确定性,提升业务能力和科技水平。云数值模式在三个方面可以应用于人工影响天气作业,即有关人影作业的方案设计、论证,作业过程的指导,作业后的分析。这样有利于建立优化播云方案、凝练和建立物理假设。数值模式能够在相同的云况条件下比较播撒与无播撒的异同,明确播云效果,也可以模拟播撒物质的扩散路径,提供外场试验和作业所需的实时预报,提供不同播撒方式产生的潜在效应。

云数值模式和资料同化可以降低传统统计检验的不确定性。采用复杂的数值模式,可以显式处理不确定性因素,并能进行作业和控制试验的时空对比。目前我国在数值模式研究方面发展迅速,已经初步具备适用于人工影响天气作业设计和效果验证试验的云和降水模式,但还没有完全实时应用到外场作业试验中,要达到这个目标,需要解决模式运行速度(如采用较低的分辨率、较简单的物理过程),同时需要采用快速云物理参数的资料同化和初始化技术。模式技术总是具有一定的不确定性,人工影响天气模式和其他数值模式一样,需要对一些因初始条件、边界条件、模式本身和人工影响过程所具有的不确定性量化,提升模式的应用能力。

最近几年,我们也确实看到了一些明显的进展,如毫米波云雷达技术的发展。这种短波长的雷达对云的观测能力更强,正在不同的观测平台上开始应用和试验。结合偏振、微波及激光等探测技术以及室内实验技术,对云的探测和定量化描述的提高将具有重要推动作用。在云数值模式中不断引入各种云观测资料的同化过程,通过改进云模式初始场中云信息的描述,提高对云结构及演变过程的模拟能力。

发展高分辨率的机载多普勒、偏振雷达,将在人工影响天气领域具有重要的潜在价值。在成冰剂播云试验中,可以利用偏振雷达监测云中过冷水滴如何转变为冰晶。在吸湿性物质播撒试验中,可以监测云中大滴的发展过程。还可以采用偏振雷达跟踪具有反射微波的金属箔片示踪物质,了解云中播撒物质的运动、扩散过程。我国最近几年在一些试验研究中也采用了偏振雷达系统,在不断完善的基础上,偏振雷达系统将在我国人工影响天气研究和

业务中发挥重要作用。

人工影响天气量化科学指标缺乏。在人工增雨方面, 首先面对的一个问题是云的可播性问题(或播撒窗口问题), 也就是说, 对现有的增雨技术, 要作业的云有没有增雨潜力(黄美元, 2011)。对人工防雹而言, 首先要判别是否是冰雹云。自然界的云千变万化, 就如同很难找到完全相同的两个人一样, 自然界中没有完全相同的两块云。因此, 每一次人工影响天气作业时, 首先需要对作业云系进行研究、判别, 确定可播性问题, 或播撒窗口问题。由于云的可播散性存在时空变化问题, 如某一个时间具有可播性, 另一时间没有可播性, 或云的某区域有可播性, 而另一区域没有可播性, 这造成了实际操作的极大困难。

播云优化技术的建立是决定播云效果的关键, 对一些关键不确定科学问题的深入探讨和理解有利于从根本上提高人影业务的科技水平。如何识别可播性云, 确定播撒剂量、时间、位置, 播撒后的响应时间, 播撒的覆盖面和影响体积, 播撒物质的跟踪、扩散、传输等, 这些关键问题的解决需要利用现代观测和数值模拟技术。

为此, 建议开展以科学试验为目的的中长期云降水物理与人工影响天气研究计划, 建立针对我国不同云系、不同作业目的的量化指标与评价方法。针对人工影响天气的作业对象和目的, 开展相关观测技术研究, 特别是偏振雷达、微波及激光探测技术等的应用与改进研究。建立先进的云雾物理室内实验技术, 开展自然云形成和人工影响的量化模拟实验。五十多年来, 科学家对探索人工影响天气新理论与技术的尝试一直没有停止, 但并没有取得突破性进展。目前基于云微物理学理论的人工影响天气技术, 虽然具有坚实的理论基础, 但在一些环节仍然存在着较大程度的不确定性, 虽然这种不确定性与大气科学本身的复杂性和认识程度密切相关, 但积极探索新的人影技术途径, 对有效降低这种不确定性是有科学和应用价值的。

参考文献 (References)

- Bruinijes R T. 1999. A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80: 805–820.
- 陈明轩, 王迎春, 肖现, 等. 2012. 基于雷达资料四维变分同化和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热动力机制的模拟分析 [J]. *大气科学*, 36 (5): 929–944, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11132. Chen Mingxuan, Wang Yingchun, Xiao Xian, et al. 2012. A case simulation analysis on thermodynamical mechanism of supercell storm development using 3-D cloud model and 4-D variational assimilation on Radar data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (5): 929–944, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11132.
- Cotton W R. 1986. Testing, implementation, and evolution of seeding concepts—A review [J]. *Meteor. Monogr.*, 21: 63–70.
- 戴进, 余兴, Rosenfeld D, 等. 2008. 秦岭地区气溶胶对地形云降水的抑制作用 [J]. *大气科学*, 32 (6): 1319–1332, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.07. Dai Jin, Yu Xing, Rosenfeld D, et al. 2008. The suppression of aerosols to the orographic precipitation in the Qinling Mountains [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (6): 1319–1332, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.07.
- 董昊, 徐海明, 罗亚丽. 2012. 云凝结核浓度对 WRF 模式模拟飑线降水的影响: 不同云微物理参数化方案的对比研究 [J]. *大气科学*, 36 (1): 145–169, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.12. Dong Hao, Xu Haiming, Luo Yali. 2012. Effects of cloud condensation nuclei concentration on precipitation in convection permitting simulations of a squall line using WRF model: Sensitivity to cloud microphysical schemes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (1): 145–169, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.12.
- 段婧, 毛节泰. 2008. 气溶胶与云相互作用的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 23 (3): 252–261. Duan Jing, Mao Jietai. 2008. Progress in researches on interaction between aerosol and cloud [J]. *Advance in Earth Sciences (in Chinese)*, 23 (3): 252–261.
- 范烨, 郭学良, 张佃国, 等. 2010. 北京及周边地区 2004 年 8、9 月层积云结构及谱分析飞机探测研究 [J]. *大气科学*, 34 (6): 1187–1200, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.12. Fan Ye, Guo Xueliang, Zhang Dianguo, et al. 2010. Airborne particle measuring system measurement on structure and size distribution of stratocumulus during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (6): 1187–1200, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.12.
- 房彬, 班显秀, 郭学良, 等. 2010. 雷达—雨量计—粒子激光探测仪联合估算降水量 [J]. *大气科学*, 34 (3): 513–519, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.03.05. Fang Bin, Ban Xianxiu, Guo Xueliang, et al. 2010. Area rainfall estimation by using Radar, rain gauge, and particle laser-based optical measurement instrument [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (3): 513–519, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.
- 方春刚, 郭学良, 王盘兴. 2009. 碘化银播撒对云和降水影响的中尺度数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 33 (3): 621–633, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.18. Fang Chungang, Guo Xueliang, Wang Panxing. 2009. The physical and precipitation response to AgI seeding from a mesoscale WRF-based seeding model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (3): 621–633, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.18.
- 方翔, 曹志强, 王新, 等. 2011. AMSU-B 微波资料反演对流云中冰粒子含量 [J]. *气象学报*, 69 (5): 900–911. Fang Xiang, Cao Zhiqiang, Wang Xin, et al. 2011. A retrieval of ice contents in convective cloud using the AMSU-B microwave data [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (5): 900–911.

- 房文, 郑国光. 2011. 巨核对暖云降水影响的模拟研究 [J]. 大气科学, 35 (5): 938–944, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.05.13. Fang Wen, Zheng Guoguang. 2011. The effect of giant cloud condensation nuclei on warm-cloud precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (5): 938–944, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.05.13.
- Fu D H, Guo X L. 2012. A cloud-resolving simulation study on the merging processes and effects of topography and environmental winds [J]. J. Atmos. Sci., 69: 1232–1249, doi:10.1175/JAS-D-11-049.1.
- Fu D H, Guo X L, Liu C H. 2011. Effects of cloud microphysics on monsoon convective system and its formation environments over the South China Sea: A two-dimensional cloud-resolving modeling study [J]. J. Geophys. Res., 116: D07108, doi:10.1029/2010JD014662.
- Fu D H, Guo X L. 2006. A cloud-resolving study on the role of cumulus merger process in MCS heavy precipitation [J]. Adv. Atmos. Sci., 23, 857–868.
- Garstang M, Brientjes R, Serafin R, et al. 2004. Weather modification: Finding common ground [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 86: 647–655.
- Guo X L, Zheng G G. 2009. Advances in weather modification from 1997 to 2007 in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 26: 240–252, doi:10.1007/s00376-009-0240-8.
- Guo X L, Zheng G G, Jin D Z. 2006. A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide [J]. Atmos. Res., 79: 183–226.
- Guo X L, Fu D H, Zheng G G. 2007. Modeling study on optimal convective cloud seeding in rain augmentation [J]. Asia-Pacific J. Atmos. Sci., 43: 273–284.
- 何晖, 郭学良, 刘建忠, 等. 2009. 北京一次大雾天气边界层结构特征及生消机理观测与数值模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (6): 1174–1186, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.05. He Hui, Guo Xueliang, Liu Jianzhong, et al. 2009. Observation and simulation study of the boundary layer structure and the formation, dispersal mechanism of a heavy fog event in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1174–1186, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.05.
- 何晖, 郭学良, 李宏宇, 等. 2011. 人工消除冷雾的个例模拟分析 [J]. 大气科学, 35 (2): 272–286, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.07. He Hui, Guo Xueliang, Li Hongyu, et al. 2011. Numerical simulation of the cold fog dissipation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 272–286, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.07.
- 何宇翔, 肖辉, 吕达仁. 2010. 利用极化雷达分析层状云中水凝物粒子性状分布 [J]. 大气科学, 34 (1): 23–34, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.03. He Yuxiang, Xiao Hui, Lü Daren. 2010. Analysis of hydrometeor distribution characteristics in stratiform clouds using polarization radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 23–34, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.03.
- 何宇翔, 吕达仁, 肖辉, 等. 2009. X 波段双极化雷达反射率的衰减订正 [J]. 大气科学, 33 (5): 1027–1037, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.13. He Yuxiang, Lü Daren, Xiao Hui, et al. 2009. Attenuation correction of reflectivity for X-band dual polarization radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 1027–1037, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.13.
- 洪廷超, 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): 1308–1323. 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), 30 (5): 1308–1323.
- 侯团结, 雷恒池, 牛生杰. 2009. 非感应起电参数化方案的对比性研究 [J]. 气候与环境研究, 14 (2): 143–152, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.02.04. Hou Tuanjie, Lei Hengchi, Niu Shengjie. 2009. A comparative study of prelightning thunderstorm electrification with different noninductive charging mechanisms [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (2): 143–152, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.02.04.
- 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, 雷恒池, 董剑希, 等. 2011. 一次区域暖雾的特征分析及数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 16 (1): 71–84, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.01.07. Hu Zhaoxia, Lei Hengchi, Dong Jianxi, et al. 2011. Characteristic analysis and numerical simulation of a regional warm fog event [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (1): 71–84, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.01.07.
- 黄建平, 何敏, 阎虹如, 等. 2010. 利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究 [J]. 大气科学, 34 (3): 548–558, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.03.08. Huang Jianping, He Min, Yan Hongru, et al. 2010. A study of liquid water path and precipitable water vapor in Lanzhou area using ground-based microwave radiometer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 548–558, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.03.08.
- 黄美元. 2011. 我国人工降水亟待解决的问题和发展思路 [J]. 气候与环境研究, 16 (5): 543–550, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.05.01. Huang Meiyuan. 2011. Urgent problems and thinking of development for precipitation enhancement in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 543–550, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.05.01.
- 黄美元, 徐华英, 周玲. 2000. 中国人工防雹四十年 [J]. 气候与环境研究, 5 (3): 318–328. Huang Meiyuan, Xu Huaying, Zhou Ling. 2000. 40 Year's Hail Suppression in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (3): 318–328, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2000.03.12.
- 黄美元, 沈志来, 洪廷超. 2003. 半个世纪的云雾、降水和人工影响天气研究进展 [J]. 大气科学, 27 (4): 536–551. Huang Meiyuan, Shen Zhilai, Hong Yanchao. 2003. Advance of research on cloud and precipitation and weather modification in the latest half century [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 536–551, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.08.
- 贾星灿, 郭学良. 2012. 人为大气污染物对一次冬季浓雾形成发展的影响研究 [J]. 大气科学, 36 (5): 995–1008, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11.200. Jia Xingcan, Guo Xueliang. 2012. Impacts of anthropogenic atmospheric pollutant on formation and development of a winter heavy fog event [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 995–1008, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11.200.
- Jia X C, Guo X L. 2012. Impacts of secondary aerosols on a persistent fog

- event in northern China [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5 (5): 401–407.
- 兰伟仁, 朱江, Xue M, 等. 2010a. 风暴尺度天气下利用集合卡尔曼滤波模拟多普勒雷达资料同化试验 I. 不考虑模式误差的情形 [J]. *大气科学*, 34 (3): 640–652, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.03.15. Lan Weiren, Zhu Jiang, Xue M, et al. 2010a. Storm-scale ensemble Kalman filter data assimilation experiments using simulated Doppler radar data. Part I: Perfect model tests [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (3): 640–652, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.03.15.
- 兰伟仁, 朱江, Xue M, 等. 2010b. 风暴尺度天气下利用集合卡尔曼滤波模拟多普勒雷达资料同化试验 II. 考虑模式误差的情形 [J]. *大气科学*, 34 (4): 737–753, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.07. Lan Weiren, Zhu Jiang, Xue M, et al. 2010b. Storm-scale ensemble Kalman filter data assimilation experiments using simulated Doppler radar data. Part II: Imperfect model tests [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (4): 737–753, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.07.
- 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 967–974, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.21. Lei Hengchi, Hong Yanchao, Zhao Zhen, et al. 2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(4): 967–974, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.21.
- 李香淑, 郭学良, 付丹红. 2008. 南海季风爆发期间大气环流结构与对流热量、水汽输送特征 [J]. *气候与环境研究*, 13 (1): 93–101, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.01.12. Li Xiangshu, Guo Xueliang, Fu Danhong. 2008. Atmospheric structure and characteristics of convection transport of heat and moisture during monsoon onset over South China Sea [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (1): 93–101, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.01.12.
- 李香淑, 郭学良, 付丹红, 等. 2011. 南海季风爆发期间中尺度对流云带演变特征与持续性加强的机理研究 [J]. *大气科学*, 35 (2): 259–271, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.06. Li Xiangshu, Guo Xueliang, Fu Danhong, et al. 2011. Studies of evolution features and persistent development mechanism of mesoscale convective clouds over the northern South China Sea [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (2): 259–271, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.06.
- 李俊, 王东海, 王斌. 2012. 中尺度对流系统中的湿中性层结构特征 [J]. *气候与环境研究*, 17 (5): 617–627, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11085. Li Jun, Wang Donghai, Wang Bin. 2012. Structure characteristics of moist neutral stratification in a mesoscale convective system [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17 (5): 617–627.
- 李兴宇, 郭学良, 朱江. 2008. 中国地区空中云水资源气候分布特征及变化趋势 [J]. *大气科学*, 32 (5): 1094–1106, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.05.09. Li Xingyu, Guo Xueliang, Zhu Jiang. 2008. Climatic distribution features and trends of cloud water resources over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (5): 1094–1106, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.05.09.
- Li X Y, Guo X L, Zhu J. 2008. Climatic features of cloud water distribution and cycle over China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25: 437–446.
- 梁宏, 张人禾, 刘晶淼, 等. 2012. 青藏高原探空大气水汽偏差及订正方法研究 [J]. *大气科学*, 36 (4): 795–810, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11149. Liang Hong, Zhang Renhe, Liu Jingmiao, et al. 2012. Systematic errors and their calibrations for radiosonde precipitable water vapor on the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (4): 795–810, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11149.
- List R. 2004. Weather modification—A scenario for the future [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85: 51–63.
- 刘贵华, 余兴, 戴进, 等. 2011. 地形云人工增雨条件卫星探测反演个例分析. *气象学报*, 69 (2): 363–369. Liu Guihua, Yu Xing, Daijing, et al. 2011. A case study of the conditions for topographic cloud seeding based on the retrieval of satellite measurements [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (2): 363–369.
- 刘红燕, 王迎春, 王京丽. 2009. 由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析 [J]. *大气科学*, 33 (2): 388–396, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.02.16. Liu Hongyan, Wang Yingchun, Wang Jingli. 2009. Preliminary analysis of the characteristics of precipitable water vapor measured by the ground-based 12-channel microwave radiometer in Beijing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (2): 388–396, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.02.16.
- 刘香娥, 郭学良. 2012. 灾害性大风发生机理与飑线结构特征的个例分析模拟研究 [J]. *大气科学*, 36 (6): 1150–1164, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11212. Liu Xiang'e, Guo Xueliang. 2012. Analysis and numerical simulation research on severe surface wind formation mechanism and structural characteristics of a squall line case [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (6): 1150–1164, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11212.
- Liu X E, Guo X L. 2012. Role of downward momentum transport in the formation of severe surface winds [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5 (5): 379–383.
- 楼小凤, 史月琴, 孙晶, 等. 2012. 中国人影响天气准隐式云分辨模式的研制和应用 [J]. *科学通报*, 57 (7): 580. Lou X F, Shi Y Q, Sun J, et al. 2012. Cloud-resolving model for weather modification in China [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 57 (9): 1055–1061, doi:10.1007/s11434-011-4934-9.
- 卢广献, 郭学良. 2012. 环北京春季大气气溶胶分布、来源及其与 CCN 转化关系的飞机探测 [J]. *科学通报*, 57 (15): 1334–1344. Lu G X, Guo X L. 2012. Distribution and origin of aerosol and its transform relationship with CCN derived from the spring multi-aircraft measurements of Beijing Cloud Experiment (BCE) [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 57 (19): 2460–2469, doi:10.1007/s11434-012-5136-9.
- 吕玉环, 李艳伟, 金莲姬, 等. 2012. 云并合过程中物理特征演变的模拟研究 [J]. *大气科学*, 36 (3): 471–486, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.10223. Lü Yuhuan, Li Yanwei, Jin Lianji, et al. 2012. Simulation of physical characteristics evolution in cloud Merger [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (3): 471–486, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.10223.
- Ma J Z, Guo X L, Zhao C S, et al. 2007. Recent progress in cloud physics research in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24 (6): 1121–1137.
- 毛节泰, 郑国光. 2006. 对人工影响天气若干问题的探讨 [J]. *应用气象学报*, 17 (5): 643–646. Mao Jietai, Zheng Guoguang. 2006. Discussions on weather modification issues [J]. *Journal of Applied Meteorology*

- logical Science (in Chinese), 17 (5): 643–646.
- National Research Council. 2003. Critical Issues in Weather Modification Research [M]. New York: National Academy Press.
- Orville H D. 1996. A review of cloud modeling in weather modification [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 1535–1555.
- 彭亮, 陈洪滨, 李柏. 2012. 3 mm 多普勒云雷达测量反演云内空气垂直速度的研究 [J]. 大气科学, 36 (1): 1–10, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.01. Peng Liang, Chen Hongbin, Li Bai. 2012. A case study of deriving vertical air velocity from 3-mm cloud radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 1–10, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.01.
- Pruppacher H R, Klett J D. 1997. Microphysics of Clouds and Precipitation [M]. New York: Springer.
- 齐彦斌, 冉令坤, 洪延超. 2010. 强降水过程中热力切变平流参数的诊断分析 [J]. 大气科学, 34 (6): 1201–1213, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.13. Qi Yanbin, Ran Lingkun, Hong Yanchao. 2010. Diagnosis of thermodynamic shear advection parameter in heavy rainfall events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (6): 1201–1213, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.13.
- Rogers D C, DeMott P J. 1991. Advances in laboratory cloud physics 1987–1990 [J]. Rev. Geophys., 29 (Supplement 1): 80–87.
- Silverman B A. 2001. A critical assessment of glaciogenic seeding of convective clouds for rainfall enhancement [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82: 903–921.
- 陶玥, 史月琴, 刘卫国. 2012. 2008 年 1 月南方一次冰冻天气中冻雨区的层结和云物理特征 [J]. 大气科学, 36 (3): 507–522, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11082. Tao Yue, Shi Yueqin, Liu Weiguo. 2012. Characteristics of stratification structure and cloud physics of the freezing rain over southern China in January 2008 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 507–522, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11082.
- 汪会, 罗亚丽, 张人禾. 2011. 用 CloudSat/CALIPSO 资料分析亚洲季风区和青藏高原地区云的季节变化特征 [J]. 大气科学, 35 (6): 1117–1131, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.11. Wang Hui, Luo Yali, Zhang Renhe. 2011. Analyzing seasonal variation of clouds over the Asian monsoon regions and the Tibetan Plateau region using CloudSat/CALIPSO data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (6): 1117–1131, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.11.
- 王帅辉, 韩志刚, 姚志刚. 2010. 基于 CloudSat 和 ISCCP 资料的中国及周边地区云量分布的对比分析 [J]. 大气科学, 34 (4): 767–779. Wang Shuaihui, Han Zhigang, Yao Zhigang. 2010. Comparison of cloud amounts from ISCCP and Cloudsat over China and its neighborhood [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 767–779, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.09.
- 肖辉, 银燕. 2011. 污染气溶胶对山西一次降水过程影响的数值模拟 [J]. 大气科学, 35 (2): 235–246, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.04. Xiao Hui, Yin Yan. 2011. A numerical study of polluted aerosol effects on precipitation in Shanxi Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 235–246, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.04.
- 徐枝芳, 龚建东, 李泽椿. 2009. 复杂地形下地面观测资料同化 III. 两种解决模式地形与观测站地形高度差异方法的对比分析 [J]. 大气科学, 33 (6): 1137–1147, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.02. Xu Zhifang, Gong Jiandong, Li Zechun. 2009. A study of assimilation of surface observational data in complex terrain. Part III: Comparison analysis of two methods on solving the problem of elevation difference between model surface and observation sites [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1137–1147, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.02.
- 杨大生, 王普才. 2012. 中国地区夏季 6~8 月云水含量的垂直分布特征 [J]. 大气科学, 36 (1): 89–101, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.08. Yang Dasheng, Wang Pucai. 2012. Characteristics of vertical distributions of cloud water contents over China during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 89–101, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.08.
- 杨洁帆, 雷恒池. 2010. AgI 焰剂对层状云催化的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 15 (6): 705–717, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.06.01. 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.06.01.
- 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.02.04. 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.02.04.
- 杨慧玲, 肖辉, 洪延超. 2011. 气溶胶对云宏观特性和降水影响的研究进展 [J]. 气候与环境研究, 16 (4): 525–542, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.04.13. Yang Huiling, Xiao Hui, Hong Yanchao. 2011. Progress in impacts of aerosol on cloud properties and precipitation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (4): 525–542, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.04.13.
- 姚展予. 2006. 中国气象科学研究院人工影响天气研究进展回顾 [J]. 应用气象学报, 17 (6): 786–795. Yao Zhanyu. 2006. Review of weather modification research in Chinese Academy of Meteorological Sciences [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (6): 786–795.
- 岳治国, 刘晓东, 梁谷. 2011. 气溶胶对北京地区不同类型云降水影响的数值模拟 [J]. 高原气象, 30 (5): 1356–1367. Yue Zhiguo, Liu Xiaodong, Liang Gu. 2011. Numerical simulation of influence of aerosols on different cloud precipitation types in Beijing area [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (5): 1356–1367.
- 张佃国, 郭学良, 龚佃利, 等. 2011. 山东省 1989~2008 年 23 架次飞机云微物理结构观测试验结果 [J]. 气象学报, 69 (1): 195–207. Zhang Dianguo, Guo Xueliang, Gong Dianli, et al. 2011. The observational results of the clouds microphysical structure based on the data obtained by 23 sorties between 1989 and 2008 in Shandong Province [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69 (1): 195–207.
- 章文星, 吕达仁. 2012. 地基热红外云高观测与云雷达及激光云高仪的相互对比 [J]. 大气科学, 36 (4): 657–672, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11057. Zhang Wenxing, Lü Daren. 2012. Comparison of cloud base heights by ground based sky IR brightness temperature

- measurements with cloud Radar and ceilometer in Shouxian [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 657–672, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11057.
- 翟菁, 胡雯, 冯妍, 等. 2012. 不同发展阶段对流云合并过程的数值模拟 [J]. 大气科学, 36 (4): 697–712, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11096. Zhao Jing, Hu Wen, Feng Yan, et al. 2012. Numerical simulations of convective cloud merging processes at different development stages [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 697–712, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11096.
- 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): 323–234, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.11. 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): 323–234, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.11.
- 赵增亮, 毛节泰, 王磊, 等. 2011. 一次典型层积云的飞机观测结果及与卫星资料的对比分析 [J]. 气象学报, 69 (3): 521–527. Zhao Zengliang, Mao Jietai, Wang Lei, et al. 2011. In situ aircraft observations of one typical stratocumulus cloud process compared with the satellite measurements [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69 (3): 521–527.
- 郑国光, 郭学良. 2012. 人工影响天气科学技术现状及发展趋势 [J]. 中国工程科学, 14 (9): 20–27. Zheng Guoguang, Guo Xueliang. 2012. Status and development of sciences and technology for weather modification [J]. Engineering Sciences (in Chinese), 14 (9): 20–27.
- 周珺, 雷恒池, 魏重, 等. 2008. 机载微波辐射计反演云液水含量的云物理方法 [J]. 大气科学, 32 (5): 1071–1082, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.05.07. Zhou Jun, Lei Hengchi, Wei Chong, et al. 2008. Retrieval method of path-integrated cloud liquid water content for airborne upward-looking microwave radiometer using a cloud model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (5): 1071–1082, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.05.07.
- 周珺, 雷恒池, 陈洪滨, 等. 2010. 层析法微波辐射计遥感反演云液水含量的二维垂直分布 [J]. 大气科学, 34 (5): 1011–1025, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.15. Zhou Jun, Lei Hengchi, Chen Hongbin, et al. 2010. Retrieval of cloud liquid water content distribution at vertical section for microwave radiometer using 2D tomography [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (5): 1011–1025, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.15.
- 周非非, 洪延超, 赵震. 2010. 一次层状云系水分收支和降水机制的数值研究 [J]. 气象学报, 68 (2): 182–194. Zhou Feifei, Hong Yanchao, Zhao Zhen. 2010. A numerical study of the moisture budget and the mechanism for precipitation for a stratiform cloud system [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68 (2): 182–194.
- 周志敏, 郭学良. 2009a. 强雷暴云中电荷多层分布与形成过程的三维数值模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (3): 600–620, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.17. Zhou Zhimin, Guo Xueliang. 2009a. A three-dimensional modeling study of multi-layer distribution and formation processes of electric charges in a severe thunderstorm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 600–620, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.17.
- 周志敏, 郭学良. 2009b. 强雷暴个例云内闪电与上升气流及液水含量关系的三维数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 31–44, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.01.04. Zhou Zhimin, Guo Xueliang. 2009b. 3D modeling on relationships among intracloud lightning, updraft and liquid water content in a severe thunderstorm case [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 31–44, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.01.04.
- 周志敏, 郭学良, 崔春光, 等. 2011. 强风暴电过程对霰粒子含量和谱分布影响的数值模拟研究 [J]. 气象学报, 69 (5): 830–846. Zhou Zhimin, Guo Xueliang, Cui Chongguang, et al. 2011. A simulative study of the influence of electric processes on the content and the size distribution of graupel in a severe thunderstorm [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69 (5): 830–846.