

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. Yang Huiling, Xiao Hui, Hong Yanchao. Progress in impacts of aerosol on cloud properties and precipitation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (4): 525–542.

气溶胶对云宏观特性和降水影响的研究进展

杨慧玲^{1,2} 肖辉¹ 洪延超¹

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 气溶胶—云—降水相互作用是当今大气科学研究的热点和前沿问题。概述性地回顾了气溶胶对云宏观特性和降水影响的研究进展, 分别讨论了气溶胶对层状云、对流云等典型云系的动力和微物理过程的影响, 总结了国内外研究关于气溶胶对云宏观特性影响的可能的物理解释。回顾外场观测及数值研究表明, 气溶胶对云液态水含量、地面降水及光学厚度的影响存在着许多不确定性。另外指出, 在研究气溶胶对云宏观特性和降水影响时, 应该加强气溶胶对云微物理特性影响的观测(卫星、雷达、飞机、地面观测等)和数值模拟的综合分析研究。

关键词 气溶胶—云—降水相互作用 宏观物理 动力

文章编号 1006-9585 (2011) 04-0525-18 **中图分类号** P462 **文献标识码** A

Progress in Impacts of Aerosol on Cloud Properties and Precipitation

YANG Huiling^{1,2}, XIAO Hui¹, and HONG Yanchao¹

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

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Aerosol - cloud - precipitation interaction is one of the most challenging problems in atmospheric research. A comprehensive review of aerosol impacts on sheet cloud and convective cloud are discussed. The proper explanations are given for the most recent findings in this field. Some results of observations and numerical simulations have shown the uncertainty of the impacts of aerosol on cloud liquid water content and surface precipitation, including optical thickness. It is emphasized that the comprehensive research both by observations (including satellite, radar, aircraft, and surface field measurements) and numerical simulations should be reinforced in the impacts of aerosol on microphysical property and structure of cloud, as well as the influence of aerosol on macro physical property of cloud and precipitation.

Key words aerosol - cloud - precipitation interaction, macro- and micro-physics, dynamics

收稿日期 2010-01-19 收到, 2011-04-20 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40875080, 国家科技支撑计划项目 2006BAC12B01-01

作者简介 杨慧玲, 女, 1983 年出生, 博士研究生, 主要从事云降水物理研究和人工影响天气研究。E-mail: huilingy2009@163.com

1 引言

气溶胶主要来源于污染粒子、海盐粒子、沙尘和烟雾等。气溶胶可以通过直接效应和间接效应等途径影响气候。气溶胶的直接效应是指气溶胶通过吸收和散射太阳辐射,直接影响地气系统的辐射平衡,而气溶胶的间接效应则指气溶胶作为云凝结核(CCN)或冰核(IN)影响云含水量、云光学特性、云量和云寿命等。间接效应又可分为两类:第一类间接效应,也称 Twomey 效应(Twomey, 1977),指气溶胶数浓度增加引起云粒子数浓度增加,云粒子半径减小,云体反照率增加(它依赖于气溶胶的吸收特性和光学厚度,假定云中液态水含量不变);第二类间接效应,也称为云生命期效应或 Albrecht 效应(Albrecht, 1989),指人为气溶胶增加引起云粒子半径减小,从而抑制降水,使云生命期发生变化。最近研究又提出了一种气溶胶对云的半直接效应(semidirect effect on cloud),即如黑碳或烟尘等一类气溶胶,由于具有较强的吸收太阳辐射,并重新向外释放热辐射的能力,从而加热大气和云团,使得云滴蒸发,云量减少,云生命期缩短,云体平均反照率减小。但是,气溶胶的气候效应很难测定,存在很大不确定性。

近一、二十年来,为了加强大气气溶胶的研究,评估气溶胶对气温、水资源的区域和全球影响,国际、国内已经实施和正在实施了几个较大的气溶胶研究项目。在国际上,有国际卫星—云—气候项目(ISCCP)(Han et al., 1994)、南半球气溶胶特性试验 ACE-1 计划、北大西洋地区气溶胶特性试验 ACE-2 计划、亚洲及太平洋地区气溶胶特性试验 ACE-Asia 计划(Brenguier et al., 2000a; Ramanathan et al., 2001b; Trochkin et al., 2003),对流层气溶胶辐射强迫观测试验(TARFOX),还有 MODIS、POLDER 和 CALIPSO 等多个卫星投入使用,进行联合观测。在国内,对气溶胶—云相互作用的科学问题也相当重视,设立了一些关于气溶胶的较大研究计划:国家自然科学基金“九五”重点项目“中国地区大气气溶胶辐射特性研究”(1997~2001 年);国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“中国

大气气溶胶及其气候效应的研究”(2006 年启动),其中专门设置了“气溶胶—云相互作用与间接辐射效应”课题;国家 973 计划项目“气溶胶物理化学特性及区域灰霾的地基网络化观测”(2006 年启动)等。

2007 年 IPCC 第四次评估报告指出,气溶胶通过改变地球能量收支影响气候。人为气溶胶的贡献(主要是硫酸盐、硝酸盐、有机碳、黑碳和沙尘)共同产生冷却效应,其直接辐射强迫总量变化范围为 $-0.9 \sim -0.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,平均为 $-0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,而云间接反照率强迫总量变化范围为 $-1.8 \sim -0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,平均为 $-0.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。然而,气溶胶对温度响应的幅度以及对云和降水的影响仍存在很大的不确定性。Rosenfeld (2006b) 指出污染气溶胶作为云凝结核,形成大量小云滴,抑制降水形成。因此,云体更亮、更厚、生命期更长,反射更多的太阳辐射回大气上空,部分地减轻了全球变暖。

在中国针对气溶胶—云—降水相互作用也开展了一些的研究,有人对这些研究工作还进行了总结。毛节泰等(2002)从气溶胶采样分析、地面卫星遥感、大气气溶胶辐射特性及气候效应等方面对气溶胶研究状况做了总结分析。Ma et al. (2007) 总结了 2003~2006 年中国云物理研究的主要进展,包括对中国近年来气溶胶—云—辐射相互作用研究的总结,指出气溶胶—云—辐射相互作用的研究(尤其是大气化学过程对云物理和降水的影响的研究)对当今气候预测和短期天气预报准确度的提高具有十分重要的意义。段婧和毛节泰(2008)综合介绍了国内外有关气溶胶与云相互作用的主要研究方法,包括卫星、PMS (Particle Measuring Systems) 机载测量系统、分档模式及体积水模式,并总结了国内外对 CCN 探测的方法,也讨论了气溶胶对暖云的间接效应。但是,这些总结对气溶胶影响降水、云寿命、云覆盖面积等方面的国内外研究情况涉及比较少,而且也缺少对充当巨核、冰核的气溶胶影响混合相云的宏微观物理过程的国内外研究成果的总结。

气溶胶对云宏观特性(云面积、云厚和液态水路径等)、微观特性(液滴和冰晶数浓度及大小分布)及降水的作用在过去几十年中受到了广泛关注,相关研究较多,从动力、热力、云微物理

过程和化学过程等方面都有所涉及,但由于该问题太复杂,目前还无法准确获得气溶胶与云特性及降水的确切关系。不同的云有不同的宏观特征,尤其是层状云和对流云,这两大类云的特性和物理过程有很大的差别(顾震潮,1980)。因此,本文将分别讨论气溶胶对这两大类云和降水物理特性的影响,并通过总结国内外已发表的关于气溶胶对层状云、对流云等宏观特性和降水可能影响的主要研究成果,提出未来研究面临的重点和难点科学问题。这些研究主要涉及观测分析、理论和数值模拟研究等方面。需要说明的是,气溶胶间接影响与气溶胶的物理和化学特性紧密相关,相关的研究工作较多(Cruz and Pandis, 1998; Abdul-Razzak and Ghan, 2000; McFiggans et al., 2005),鉴于篇幅原因,本文主要讨论进入云中活化的气溶胶,它通过充当云凝结核[CCN、巨核(Giant CCN, GCCN)、冰核(IN)]对云和降水过程和物理特性的影响,而对气溶胶活化过程没有给予总结。

2 气溶胶对云宏观特性的影响

由图1看出,气溶胶(体现在CCN、IN的数浓度和尺度分布)影响云宏观特性(云面积、云尺度、云中液态水路径等),而云中液态水路径(LWP)对边界层温度、湿度的变化很敏感,目前无法建立它们之间的统计关系,定量估计气溶胶对云宏观特性的影响尚十分困难。由于包含有黑碳等吸收性物质成分的气溶胶(通常称为吸收性气溶胶)与由污染粒子、海盐粒子、沙尘等成分组成的气溶胶对云的影响特性不同,因此,文中将他们分开讨论。

2.1 层状云

气溶胶充当云凝结核(CCN)影响层状云的云覆盖面积和云尺度,现有的观测和模拟结果存在不一致。例如,卫星观测分析(Tanr  et al., 1997; Remer et al., 2002)得到,6~8月大西洋上层状云的云覆盖面积增加与在其上空观测到的4种类型气溶胶(20°S~30°S范围的海盐气溶胶,20°S~5°N范围的烟雾气溶胶,5°N~30°N区域的沙尘气溶胶,30°N~60°N污染气溶胶)浓度的增加有关,这与Albrecht效应的结果一致,其可能的解释是,CCN浓度的增加抑制了降水,增加了云寿命和云覆盖面积。然而,大涡模式(LES)模拟结果却显示,气溶胶浓度增加,导致边界层云中CCN浓度和云滴浓度增加,并加强云体通过云顶向周围大气输送水分的能力,使云中LWP和云覆盖面积减小(Jiang et al., 2002; Ackerman et al., 2004)。

吸收性气溶胶(如黑碳等)对云特性的影响与普通气溶胶不同,它通过吸收太阳光,影响辐射传输,并可能加速边界层云的消亡,减少云覆盖面积。卫星观测(Koren et al., 2004)表明,亚马逊森林地区大量烟雾气溶胶使边界层云覆盖面积减少,其云量从清洁大气时的38%降低到浓烟(光学厚度1.3)时的0;观测还显示,在生物质燃烧的地区,边界层云的覆盖量明显减少(Koren et al., 2004)。

研究表明,吸收性气溶胶和边界层云中LWP呈非线性关系。Feingold et al. (2005)用包含详细气溶胶和云滴分档微物理过程的大涡数值模式模拟发现,烟雾位置、地面净辐射、地面感热和潜热通量都影响边界层云的形成。吸收性气溶胶引起地面感热、潜热通量变化,这可能是LWP对

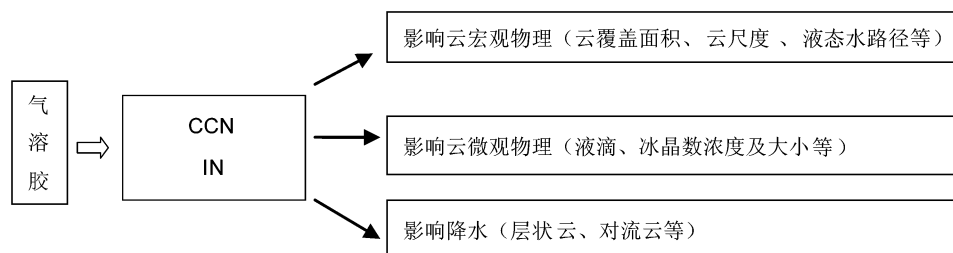


图1 气溶胶对云宏观物理和降水的影响过程

Fig.1 Aerosol impacts on cloud macro- and micro-physics and precipitation

气溶胶呈非线性关系的主要原因。当气溶胶增加时,有可能增加 LWP,抑制降水;但气溶胶增加引起地面辐射通量减少又可能抑制对流,从而减小 LWP (Jiang and Feingold, 2006)。

高浓度的沙尘气溶胶(可以充当 CCN、IN,特别是充当 GCCN)被输送到下游地区边界层云顶之上,减少入射的太阳辐射,增加云顶之上的大气热量,层状云覆盖面积增大 (Johnson et al., 2004; Kaufman et al., 2005a, 2005b)。同时,从云顶之上落下的沙尘可能在云顶形成冰核,通过冰相过程影响降水。但是,目前还没有关于低云覆盖面积的气象预报因子的研究成果,而且分别统计气溶胶和气象场对云影响的结果也很受质疑。

2.2 对流云

空气污染、扬尘、生物燃烧产生的气溶胶可影响对流云的覆盖面积和云尺度。卫星观测 (Koren et al., 2005) 发现,大西洋上空低浓度气溶胶环境中对流云云覆盖面积(云量)为 30%,而烟雾弥漫的大气中对流云云覆盖面积(云量)增加到 60%,云滴尺度减小 20%,云顶增高,早期降雨受到抑制,上升气流加强。这些观测结果和一些理论研究结果 (Andreae et al., 2004; Khain et al., 2005; Teller and Levin, 2006) 一致。Xue and Feingold (2006) 用大涡模式模拟气溶胶对海洋性单体信风积云的影响,结果显示,当气溶胶浓度增加时,积云单体的云量、云滴尺度、云顶高度、云厚和地面降水量均减小,通过与积云动力场的演变特征相比较,他们认为:气溶胶对云中动力场的影响较大,而对 LWP 和云量的影响很小。但由于降水、液滴蒸发及其与环境场之间的联系,使云—气溶胶关系十分复杂。

气溶胶对单体对流云和多单体对流云系的影响不同。当气溶胶浓度增加时,可使单体对流云覆盖面积和云尺度减少,而使多单体对流云系覆盖面积增加。Rosenfeld (2006a) 认为气溶胶—云相互作用影响强对流云的动力过程、生命期和潜热的垂直分布。Wang et al. (2003) 研究表明,云量减少是小云滴大量蒸发及其与环境场相互作用的结果。但是,这个结果只适用于小尺度(大约 10^2 m 量级)的单体云,而与 Albrecht 假设以及卫星观测的气溶胶增加导致多单体对流云系云量增加的结果是相反的 (Kaufman et al., 2005a,

2005b)。但是,这些研究大都针对不降水或降水很少的暖对流云,而有关气溶胶对含有冰相水成物的对流云云覆盖面积影响的研究较少。在不同大气条件下,含水量、对流稳定度等因子也可能影响云覆盖面积,卫星无法直接探测到这些因素的影响,气象观测也无法预测这些热力、动力学因子,现在还缺乏这方面的研究。

研究还表明,吸收性气溶胶(如黑碳等)对信风积云的影响随云覆盖面积的不同而不同,吸收性气溶胶使覆盖面积大的积云的 LWP 明显增加,而对覆盖面积小的积云影响很小。例如,Johnson et al. (2004) 和 Johnson (2005) 用考虑体积分物理过程的大涡数值模式模拟信风积云的结果说明,气溶胶的半直接效应对覆盖面积较大(云量为 0.1~0.5)的信风积云影响明显(使 LWP 减少),而对覆盖面积较小(云量为 0.05~0.2)的信风积云影响不明显。

气溶胶浓度增加可能使层积云中 LWP 增加、减少或保持不变 (Platnick et al., 2000; Coakley and Walsh, 2002; Han et al., 2002)。针对这些状况,Albrecht (1989) 和 Ackerman et al. (2004) 用流体动力学模式模拟了气溶胶对层积云中 LWP 的影响,结果显示在层积云中增加气溶胶确实不一定使 LWP 增加,他们发现气溶胶对 LWP 的影响取决于大气逆温层之上湿度廓线的分布状况。进一步的模拟 (Lu and Seinfeld, 2005) 表明,当逆温层之上湿度大时,增加气溶胶,可使 LWP 增加;当逆温层之上很干燥时,增加气溶胶可使 LWP 减小。赵春生等 (2005) 利用详细的气溶胶和云粒子分档数值模式研究的结果也显示,云中液态水含量随高度的分布并不随海盐、硫酸盐的数浓度及云团上升速度的变化而变化。

吸收性气溶胶位于层积云的不同位置对层积云中 LWP 影响是不同的。Johnson et al. (2004) 用大涡模式模拟得到,当吸收性气溶胶位于混合边界层内时,层积云的 LWP 和云覆盖面积减小,而当吸收性气溶胶位于层积云云顶之上时,可使逆温增强,干空气输送减弱,LWP 增加。

3 气溶胶对云微观特性的影响

人为气溶胶增加引起云凝结核数浓度增加,

进而引起云滴数浓度增加, 这已被大量观测研究证实。飞机观测 (Taylor and McHaffie, 1994; Gultepe et al., 1996; Snider and Brenguier, 2000; Ramanathan et al., 2001a, 2001b; Chuang, 2003) 发现, 云滴浓度和气溶胶浓度的增长速率存在非线性关系, 当气溶胶浓度小时, 云滴浓度随着气溶胶浓度的增加而快速增加, 但随着气溶胶浓度持续增大, 云滴浓度增加趋势减缓。其原因首先是, CCN 只是凝结核 (CN) 的一部分, 在一定过饱和度条件下, 活化的 CCN 数浓度与气溶胶尺度谱分布和化学组成有关; 其次, 可活化的 CCN 数量还与云底垂直上升气流的大小有关。在层积云中, 上升气流速度一般小于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级时, 只有少量 CCN 活化, 而在深对流云中, 垂直上升速度可能大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 使大量的 CCN 活化。因此, 云滴与气溶胶浓度之比从 70% (如北大西洋对流云) 变化到 10% (如亚热带层积云)。

气溶胶一旦进入云中, 它可以充当云凝结核 (CCN, GCCN)、冰核 (IN), 影响云滴、冰晶的形成。在云物理学中, 巨核 (GCCN) 一般是指半径大于 $1 \mu\text{m}$ 的云凝结核, 但在许多数值模拟的文献中在讨论巨核的作用时通常将半径大于 $3 \mu\text{m}$ 的云凝结核作为巨核。虽然巨核是云凝结核的一种类型, 但现有很多研究 (Feingold et al., 1999; Khain et al., 2000; Yin et al., 2000b; Teller and Levin, 2006) 显示 GCCN 和一般尺度较小的云凝结核 (CCN) 对云宏观特性的影响明显不同, 因此, 本文将对 GCCN 和 CCN 的作用分开讨论。以前普遍认为, 矿物粉尘是冰核的来源 (汪学林等, 1965; 赵剑平, 1965; 石安英, 1980; 酆大雄和陈汝珍, 1994; 游来光和杨绍忠, 2002), 而不是 CCN 的来源 (Pruppacher and Klett, 1978), 但近年来许多外场观测和数值模拟表明, 沙尘矿物气溶胶的化学特性在长距离传输过程中通过非均相化学过程改变, 一些海盐及硫酸盐覆盖在不可溶气溶胶表面 (Zhou et al., 1996; Xiao et al., 1997; Yin et al., 2002; Levin et al., 2005; 黄蔚薇等, 2007), 增加气溶胶形成云凝结核的可能性。受硫酸盐气溶胶影响, 大云滴多出现在云底附近。

3.1 层状云

分析河北省 1990 年 10 月~1991 年 4 月的 PMS 观测资料发现, 层状云云下气溶胶数浓度和云滴数浓度存在正相关关系 (黄梦宇等, 2005); 北大西洋和东太平洋云滴数浓度 (N_c) 和云下气溶胶数浓度 (N_a) 存在关系为 $N_c = 197 [1 - \exp(-6.13 \times 10^{-3} N_a)]$ (其中 N_c 和 N_a 以 cm^{-3} 为单位) (O'Dowd et al., 1999)。

气溶胶数浓度影响云滴尺度分布 (Wetzel and Stowe, 1999; Breon et al., 2002)。研究发现 (Garrett and Hobbs, 1995; Breon et al., 2002), 随着气溶胶指数 (即空气柱内气溶胶数浓度) 的增加, 云滴尺度减小。气溶胶对云滴尺度的影响具有全球性, 但由卫星数据反演得到的结果比理论值小, 其原因可能是由于卫星对比较均匀的云层的云滴尺度反演结果较合理, 而对时空变化很大的对流云的云滴尺度反演结果较差。

3.2 对流云

气溶胶充当云凝结核 (CCN、GCCN)、冰核 (IN) 影响云中水滴、冰晶大小及其浓度, 因此, 气溶胶对对流云的微观特性也产生影响。这方面的研究结果概括如下:

3.2.1 CCN 的影响

(1) CCN 浓度对对流云的水滴、冰晶大小及其数浓度有影响。飞机、地面观测及卫星反演表明, 高浓度污染气溶胶进入云体形成高浓度的 CCN, 引起云滴浓度增加, 而云滴尺度减小 (Warner and Twomey, 1967; Warner, 1968; Kaufman and Nakajima, 1993; Rosenfeld and Lensky, 1998; Andreae et al., 2004), 雨滴碰并增长效率降低 (Squires and Twomey, 1961; Warner and Twomey, 1967; Warner, 1968; Rosenfeld, 1999), 同时, 大量小云滴被强盛的上升气流输送到高空, 冻结形成冰晶, 促使对流云动力过程增强, 云中冰晶浓度随高度增加 (Phillips et al., 2002), 云顶温度低, 对流云发展深厚, 进而可以形成闪电, 冰雹和大雨。肖辉等 (1988a, 1988b) 利用详细分档的一维积云数值模式, 研究了在相同宏观条件下大陆性 CCN 谱和海洋性 CCN 谱对积云滴谱形成的影响。结果表明, CCN 总浓度对云滴谱形成有很大影响, 核总浓度小有利于云中大云滴形成、云滴谱展宽和含水量

增大,而在核总浓度相同或相近的情况下,即使核谱谱型不同,形成的云滴谱分布、含水量都非常接近,说明大陆性和海洋性积云云滴谱的差异主要是盐核总浓度不同所致,而不是由于大陆上空缺少足够浓度巨盐核的缘故。他们解释了可能的原因:尽管盐核的凝结率随核质量而变,但盐核通过凝结在很短时间内形成水滴的大小主要与环境过饱和度有关,而与核质量关系不大。模式模拟中还考虑了云滴碰并过程的作用,因此较大云滴还能通过碰并过程形成,所以不同盐核谱型对云滴谱影响很小。

层积云中云滴数浓度与 CCN 浓度、环境温度及云底部垂直上升气流密切相关 (Brenguier et al., 2000a, 2000b; Ramanathan et al., 2001a, 2001b)。当然,边界层稳定度也影响污染物进入云体的程度,并且影响层积云的维持时间 (Liu et al., 2000; Jiang et al., 2002)。有研究显示,随着云滴数目的增加,云滴有效半径减小,其中硫酸盐对云滴数目的影响起主导作用,海盐在水汽相对充足情况下可增加云滴数目,而在水汽相对不足的情况下却减少云滴数目;在硫酸盐粒子浓度特别大的情况下(污染严重),如果水汽相对不足,云滴数目会明显小于硫酸盐粒子的浓度,而海盐粒子的存在加剧了水汽供应的不足,从而可以在很大程度上进一步降低云滴数目(赵春生等, 2005; Zhao et al., 2005)。Zhao et al. (2006b) 分析了飞机观测的云滴谱相对分散度(ϵ)和云滴数浓度(N_c)之间的关系,结果显示,当云滴数浓度小时, ϵ 在 0.2~0.8 之间变化;当云滴数浓度高时, ϵ 在 0.4~0.5 之间变化。他们发现,云滴谱分布是估计气溶胶间接效应的一个重要参数,与一般浓度的气溶胶辐射强迫相比,高浓度气溶胶辐射强迫的不确定性可以降低 10%~40%,这个发现对污染大气条件下的气候预报有重要意义。

层积云中平均液态水含量随高度的增加而增大,云滴均立方半径随高度的增加而增大,在离云底不远处云滴数浓度达到最大值,并在层积云云顶附近与环境场混合 (Brenguier et al., 2000a, 2000b)。Latham and Reed (1977)、Baker and Latham (1979)、Baker et al. (1980) 和 Burnet and Brenguier (2007) 研究表明,气溶胶影响云滴大小分布依赖于大气环境的热力、动力特性,

在均匀混合时,云滴尺度减小而云滴数浓度不变;非均匀混合时,云滴尺度不变而云滴数浓度减少。

(2) CCN 浓度还影响发展旺盛的对流云中冰晶的生成效率。Khain et al. (2001) 发现,在清洁环境 (CCN 数浓度为 100 cm^{-3}) 里形成的云中有大滴生成,并很快在 -15°C 冻结,云水消耗显著;而在污染环境 (CCN 数浓度为 1260 cm^{-3}) 里形成的云中,水滴在 -35°C 冻结,这是由于小滴生成冰晶效率低,只有达到均质核化温度才能冻结的缘故。这与观测到的污染大气中低于 -38°C 环境中仍有大量液态水存在相吻合 (Rosenfeld, 2000; Rosenfeld et al., 2006)。

3.2.2 IN 的影响

冰核 (IN) 影响云中冰晶浓度,进而影响云微物理特性。北京地区的冰核观测实验 (游来光和杨绍忠, 2002) 显示,可以在 -20°C 活化的冰核浓度,1963~1995 年增长了 15 倍。中国气象科学研究院三维对流云模式模拟 (Li et al., 2004) 显示,当冰核浓度增加 5 倍时,多数降水过程的云顶高度、云顶覆盖面积和冰晶数量均有所增加,但冰晶尺度减小,进而影响云的辐射特性。分析 MODIS 卫星数据 (Huang et al., 2006a, 2006b) 发现,沙尘污染地区比未污染地区冰云的粒子有效半径、光学厚度和冰水路径含量分别减小 11%、32.8% 和 42%;污染地区云水路径含量比未污染地区的小,因此,他们认为,气溶胶的半直接效应对东亚干旱、半干旱地区云的发展起到重要作用,对降水量的减少有重要贡献。

如果污染大气中有大量冰核 (IN) 存在,那么,冰晶可在较高的温度中形成。在美国,印第安纳州位于芝加哥的下风方向,降水和冰雹增加,这可能和芝加哥附近钢厂污染排放有关 (Changnon, 1980)。一维模式模拟 (Danielsen, 1997) 结果显示,冰雹的生成对初始 CCN、IN 浓度十分敏感。如果污染能加强上升气流速度,冰雹尺寸可能增加,冰雹的大小和风暴中上升气流速度密切相关。卫星观测表明,雹云与其他云团不同,它具有粒子有效半径较大,气溶胶光学厚度大的特点 (张杰等, 2004)。

3.2.3 GCCN 的影响

观测表明,部分气溶胶直径超过 $1 \mu\text{m}$ 的 GC-

CN 的数浓度只有 10^{-3} cm^{-3} , 大约只占 CCN 浓度的 $1/10^5 \sim 1/10^6$ (Woodcock, 1953; Nelson and Gokhale, 1968; Hindman, 1975; Johnson, 1976, 1982)。这部分气溶胶在降水形成中可以充当理想的碰并胚胎 (Johnson, 1982; Feingold et al., 1999; Yin et al., 2000b)。根据 Köhler 方程, 当凝结核完全溶解 (例如海盐粒子、包有可溶解层的混合粒子、非常大的粒子或者吸湿性很强的粒子), 形成 GCCN, 进而产生的大滴尚未达到临界大小时就能产生碰并作用 (Levin and Ganor, 1996)。模式结果显示, GCCN 对污染云比对清洁云影响大 (Feingold et al., 1999; Khain et al., 2000)。如果污染气溶胶中有 GCCN 存在, 则容易生成大滴, 并可在较高的温度和较低的高度上形成冰晶 (Teller and Levin, 2006; Yin et al., 2000b), 当液态水供应充足时, 冰晶加速淞附增长, 形成霰粒或冰雹。

3.3 其他类型云 (如地形云等)

高浓度的 CCN 进入地形云中后, 小云滴大量形成, 云滴尺度减小, 雨滴生成速率降低, 冰晶生成时间推迟, 大量冰晶在高空更低的温度下生成, 抑制生命期较短的地形云降水。

4 气溶胶对降水的影响

近年来, 数值模式模拟及观测研究 (Feingold et al., 1999; Khain et al., 1999; Yin et al., 2000a, 2000b, 2000c; Saleeby and Cotton, 2004; Rosenfeld et al., 2006; Teller and Levin, 2006; 陈丽等, 2007; Cotton et al., 2007) 表明, 气溶胶作为云凝结核对降水有重要影响。气溶胶来自环境大气, 不同环境中垂直水汽廓线和稳定度差异大, 很难建立 CCN 和降水的关系。边界层云降水对环境湿度、稳定度的敏感性高; 对流云云底之上绝热液态水含量随高度增加, 降水依赖于云厚, 一般比边界层云降水多, 对稳定度和低层释放的感热、潜热敏感性高。

气溶胶充当凝结核 (CCN、GCCN)、冰核 (IN) 形成云滴和冰晶, 影响初始降水的形成效率。巨核 (GCCN) 充当胚胎生成大滴, 加速水滴碰并增长, 有利于降水生成。随着污染加重, 降水量趋向减少 (陈隆勋等, 2004; Zhao et al.,

2006a), 在此情形下巨核的作用更加明显。世界上许多降水来自于冰相过程 (陈宝君等, 2005a), 自然及人为排放的部分气溶胶可以充当冰核 (IN), 对云的宏观物理过程和降水的形成及演变有十分重要的影响。云中许多微物理过程可以生成冰晶, 研究者希望冰晶和冰核有很好的相关, 但观测显示, 云中冰晶浓度是冰核浓度的许多倍, 人们将这一现象归结为冰晶繁生过程。目前, 人们对气溶胶—云滴的相互作用了解较多, 但对气溶胶—冰晶的相互作用了解较少, 污染气溶胶对降水 (尤其是云中冰晶过程影响的降水) 的作用还很难估计, 了解气溶胶对混合云降水的影响还有很大的难度, 需要有更多的观测及模拟研究, 因此, 气溶胶对降水的影响是当前研究中的重点问题。

4.1 层状云降水

Warner (1968) 早在 1968 年分析人为气溶胶排放源上、下风方向的降水资料时, 就注意到甘蔗燃烧产生的烟雾可能抑制降水。起初, 他认为气溶胶是通过影响云特性而抑制降水的 (Warner and Twomey, 1967), 但后来更加细致的分析并没有证实这种作用 (Warner, 1971)。

Hobbs et al. (1970) 发现在华盛顿造纸厂下风方向暖云的降水增加 30%, 但一维模式模拟显示, 造纸厂排放的 GCCN 不足以引起观测到的降水增加量, 因此, 他们认为, 热量、水汽及造纸厂排放的 CCN 都可能与降水的增加有关。

4.2 对流云降水

气溶胶对对流云降水的影响与对流云的发展状况有关。由于气溶胶对单体对流云、多单体对流云系和强风暴降水的影响不尽相同, 因此下面主要针对这几种情况分别讨论。

4.2.1 对层积云降水的影响

由于气溶胶影响液态降水和冰相降水的机制不同, 只有了解液态降水和冰相降水对一个地区总降水的贡献, 才能更好地了解气溶胶对降水的潜在作用。对于只包含液态降水的低云容易估计这种贡献, 但对全球降水有重要作用的混合相层积云降水很难估计这种贡献。由于混合相层积云包含有液相和固相物质, 可以通过许多云微物理过程 (如碰并、凝华、淞附过程等) 形成降水。冰晶在混合相层积云降水中起了十分重要的作用。

混合相层积云出现频率高,覆盖范围广 (Warren et al., 1986), 是许多地面观测和模式研究的重点。

(1) 污染气溶胶对混合相层积云降水有十分重要的影响。卫星观测发现,高浓度气溶胶使混合相层积云云量、反照率、光学厚度及云顶高度增加,低层暖云减少而中层混合云增加。高浓度气溶胶抑制云中的暖雨过程,延缓暖云降水,最终使得混合相层积云变弱,地面累积降雨量减少,云寿命延长 (Jiang et al., 2002; 王春明和叶家东, 1997)。研究发现,气溶胶日变化和中雨降雨频率正相关,和小雨降雨频率负相关 (Choi et al., 2008)。气溶胶对中国夏季降水频率有重要影响,他们的年变化关系为:气溶胶浓度逐年增加而中国夏季降水频率和湿度逐年减少。气溶胶日变化与中国夏季降水频率正相关,而中国夏季降水频率的年变化取决于其他因子,例如区域、全球气候变化引起的湿度变化等。湿度的持续降低引起中国夏季降水频率持续减少,同时随着人类排放气溶胶的增加,空气中气溶胶浓度可能持续增长。Cheng et al. (2005) 分析中国 30 年气溶胶光学厚度地面观测数据认为,气溶胶的间接效应引起长时间的中国南方降水减少,但对中国华东地区的影响并不严重。Zhao et al. (2006a) 分析中国中东部观测的降水、MODIS 数据和气象探空资料发现,这些地区 40 年的降水明显减少,气溶胶浓度显著增加。

(2) 巨核 (GCCN) 对混合相层积云降水的影响和大气污染状况有关,在高浓度 CCN 环境中 GCCN 对降水形成起重要作用, GCCN 浓度增加则降水增加,而在清洁环境中 GCCN 影响较小。例如,Feingold et al. (1999) 用包含有详细分档云微物理过程的三维大涡模式研究表明,当云中 CCN 浓度为 $50 \sim 250 \text{ cm}^{-3}$ 、GCCN 浓度为 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$ 时,足以使一个不降水的层积云变成降水云,而当云中的 CCN 浓度更低时,增加 GCCN 对毛毛雨形成的影响很小 (Woodcock et al., 1971; Takahashi, 1976)。Yin et al. (2000b) 利用二维面对称对流云模式研究发现,当云中的 CCN 浓度为 1700 cm^{-3} , GCCN 浓度为 0.02 cm^{-3} 时可以比清洁云 (CCN 为 100 cm^{-3} , 没有 GCCN) 产生更多的降水。此结果和在美国汤森港观

测到的造纸厂污染及阿拉伯海附近海盐对云微观特性的影响结果 (Eagan et al., 1974; Hindman et al., 1977; Rudich et al., 2002) 一致。

由于巨核在污染大气降水中的重要作用,近年来,许多研究者利用数值模式研究表明,通过播撒更多大的吸湿性粒子或盐核是在污染大气条件下人工增加降水的有效途径 (Hindman et al., 1977; Cooper et al., 1997; Yin et al., 2000c; Segal et al., 2004; 陈宝君等, 2005b)。

GCCN 和云中液态含水量增长率、云滴数浓度及液态含水量增长时间等呈非线性关系,然而,到目前为止,还缺乏 GCCN 对降水的作用定量研究,也没有看到任何 GCCN 对相关参数作用的定量研究。

(3) 数值模拟显示,改变冰核浓度对地面降水有重要的影响,并且,在有些情况下还可导致地面加热,而在有些情况下却使地面冷却 (Lohmann, 2002; Carriö et al., 2005a, 2005b)。

4.2.2 对单个对流云体降水的影响

目前,气溶胶影响单个对流云体降水的研究主要从气溶胶 (CCN、GCCN、IN) 浓度、动力输送及气溶胶和云微物理过程的相互作用几个方面考虑。

(1) CCN 浓度增加时,云滴尺度减小,暖雨的雨滴碰并过程受到抑制,雨滴数量减少,暖云降水效率减小 (Reisin et al., 1996a, 1996b)。

气溶胶还可以以 GCCN、IN 的方式影响云和降水过程。在不同地区这种影响的程度是不同的。Reisin et al. (1996a, 1996b) 用包含详细液相和冰相水成分档微物理过程的轴对称对流云数值模式研究显示,IN 对污染程度不同的云作用不同。CCN 浓度很高的严重污染云中 (1100 cm^{-3}), 增加冰核浓度,降水明显增加,而对于一个中度污染的云 (600 cm^{-3}), 增加冰核浓度,降水的变化不明显 (Reisin et al., 1996b)。有研究者 (Yin et al., 2000a; Teller and Levin, 2006; 陈丽等, 2007; 陈丽和银燕, 2008; Cheng et al., 2009) 利用包括详细云微物理过程的对流云数值模式研究了亚热带地区气溶胶对混合相对流云的影响,发现污染气溶胶增加 (即 CCN 增加), 地面降水减少,而在污染大气中, GCCN 增加 (每升中含有几个), 云中碰并作用增强,地面总降水

量增加,但在清洁大气中,增加 GCCN,降水变化不明显。运用 Meyers et al. (1992) 参数化方法,在已增加 GCCN 的条件下,再增加冰核浓度 (IN),可使水成物有效半径减小,暖云和冷云降水过程都受到抑制,地面总降水量减少,而且在清洁大气比污染大气中显著。数值模拟研究显示,在干旱和半干旱气候背景下,混合云的累积降水量对沙尘气溶胶数浓度变化的敏感性要高于对大气环境湿度的敏感性,沙尘气溶胶增加导致云累积降水量减少 (Huang et al., 2006; 康凤琴等, 2009)。

(2) 由于动力过程影响云粒子大小筛选及冰、液相物质的空间分布,因此需要综合考虑动力过程和 CCN 的作用。Khain et al. (1999) 用二维面对称模式和分档微物理过程相结合,模拟地中海东岸气溶胶对降水的影响,研究发现,在污染环境中,气溶胶的增加使暖云降水明显减少,许多小云滴被输送到冻结高度,生成小的霰粒子和冰晶粒子,冰相物质融化而形成的降水增加,在对流云区产生较强的下沉气流。

(3) 把气溶胶和云微物理过程当作一个相互作用的系统来处理十分重要。二维、三维模式模拟显示,深对流云云砧中大量冰晶来源于对流层中层里的气溶胶,而不是边界层里的气溶胶 (Fridlind et al., 2004; Yin et al., 2005)。水成物在对流层中层蒸发,析出气溶胶,这些气溶胶重新进入大气,会对云微物理过程有重要影响。如果忽略这个过程,霰浓度可能增加两倍,地面降水增加 50%。Seifert and Beheng (2006a) 对飑线过程的模拟研究显示,当不考虑云中析出的气溶胶重新进入大气的过程时,在飑线的前方可以产生二次对流,但考虑这个过程时,二次对流受到抑制。

4.2.3 对多单体云系和超级单体风暴降水的影响

本节主要讨论污染气溶胶、沙尘气溶胶、烟雾气溶胶对多单体云系及超级单体风暴降水的影响。

(1) 污染气溶胶—云微物理—动力场相互作用对对流云降水有重要影响。Seifert and Beheng (2006b) 认为,CCN 浓度变化对不同发展程度的混合相对流云影响不同。对小单体对流云,CCN 浓度增加,地面降水量和最大上升气流速度减小,

而对多单体对流云风暴,CCN 浓度增加则有相反的作用,即促进二次对流,降水初始形成时间推迟,最大上升气流速度和地面总降水量增加;但是,超级单体风暴对 CCN 浓度不敏感。云微物理—动力相互作用最重要的途径是冻结潜热释放。模式研究深对流云得到 (Khain et al., 2004; Zhang et al., 2005): 在污染环境中,小云滴数增加,大云滴数减少,小云滴冻结时释放大潜热,对流发展旺盛;在非污染环境中,较大的毛毛雨滴大量消耗云水,使得向上输送的液态水减少,冻结潜热释放减少,对流云发展较弱。模拟还显示,对于大陆气溶胶环境中有飑线形成,产生大量降水的个例,换为清洁大气环境时则没有飑线形成 (Khain et al., 2004)。Lynn et al. (2005) 用中尺度模式模拟佛罗里达州深对流云显示,和清洁环境相比,污染环境中高浓度 CCN 延迟降水起始形成时间,对流发展旺盛,最大降水率增加,但总累积降水量减少。

由于城市地区特殊的气象环境场,下垫面状况存在很大的动力和热力以及气溶胶分布不均匀性,因此,有人专门针对城市地区的污染气溶胶和降水的相互作用进行了研究,结果发现,这种相互作用十分复杂。模式研究显示,只有当对流风暴形成后,城市中的大量气溶胶对风暴动力、微物理特性及降水过程才有重要的影响 (Cotton et al., 2007)。和清洁大气气溶胶浓度的试验相比,城市地区上空污染气溶胶浓度增加时,云水和雨水形成快,初始上升气流强,在对流云发展的最初 1.25~1.5 小时,有大量的过冷水存在,旺盛的上升气流产生更多的冰晶混合比,地面降水增加,但随着地面降水形成,下沉气流增强,强冷池提前出现,抑制上升气流,城市风暴提前消亡,日累积地面降水量减少。然而,由于微物理和动力之间复杂的非线性关系,城市地区上空气溶胶对下风方的对流云和降水的影响仍然很难确定。

(2) 沙尘气溶胶可以充当云凝结核 (CCN、GCCN) 和冰核 (IN) 影响对流风暴云微物理过程和动力特性 (Van Den Heever et al., 2006),进而影响对流风暴云的降水。和清洁大气相比,沙尘气溶胶使风暴云内上升气流、冰晶化过程和含水量增加,对流发展旺盛,强对流形成后前两

个小时地面降水量增大,但之后降水量减少,地面累积降水量减少。这是气溶胶—动力场反馈及云下雨滴蒸发的共同结果,低层冷池影响风暴传播以及沙尘清除,初始风暴降水清除了沙尘气溶胶,GCCN 及 IN 在大气中停留时间短,使得累积地面降水量较少。

(3) 烟雾气溶胶,含有丰富的 GCCN,加速暖雨形成及云中的冰晶核化过程,进而影响对流云降水的进程。Mather (1991) 研究发现,在南非,造纸厂下风方向的深对流云降水量明显增加,此观测结果引发了广泛利用吸湿性粒子进行人工增雨试验的活动。Lin et al. (2006) 分析 MODIS 和 TRMM 卫星资料发现,亚马逊地区旱季森林火灾引起气溶胶光学厚度增加,云厚增大,云中冰晶浓度增加,降水增加。

4.3 对其他类型云(地形云、极地层云)降水的影响

4.3.1 地形云

地形云形成于山脉水汽抬升的地方,并且在相同环境条件下地形抬升引起的降水大于平原地区。地形云降水是世界上许多地方主要的水资源来源。观测及模式研究显示,污染气溶胶对地形云降水影响较大,这主要是由于地形云液态水含量适当,雨滴和冰晶在云中停留时间短及地形云覆盖范围广所致。有观测研究表明,污染气溶胶每年可以减少地形云降水量 30% (Rosenfeld et al., 2007),但还有很大不确定性,因此,研究气溶胶对地形云降水的作用仍然十分重要。

(1) 观测研究表明,污染气溶胶使洛基山脉地区冬季地形云降水延迟,其原因是污染气溶胶增加,CCN 和小云滴数浓度增加,雪粒子淞附过程减慢,沉降速度减小,冷云降水(雪)量减少(Borys et al., 2000, 2003)。

(2) 对地形云降水增长因子 R_0 (即山区的降水量与上风方低洼地区降水量之比) 研究发现,气溶胶抑制地形云降水(Griffith et al., 2005; Jirak and Cotton, 2006; Rosenfeld and Givati, 2006; 戴进等, 2008; 徐小红等, 2009)。例如: Givati and Rosenfeld (2004) 选取美国加利福尼亚和以色列两个地区(两个地区地形相似,但以以色列山较低),对比分析近 100 年污染源下风方和没有污染源地区的降水,统计结果显示,污染源

下风方和山地上坡/山顶地区,地形云的降水量分别减少 20% 和 7%,而在山体背风方更远的下风方,降水量增加 14%。他们解释认为,在污染源的下风方由气溶胶形成大量小云滴,这些小云滴增长需要很长时间,上坡风携带这些小云滴到山顶上方使那里的云滴浓度增大,抑制了降水形成。戴进等(2008)以华山站为影响站,周围的西安、渭南和华阴站作为对比站,定量研究了秦岭地区气溶胶对地形云降水的抑制作用,研究结果发现,有观测以来 R_0 逐年递减,减幅为 14%~20%; R_0 的减少趋势与能见度递减、气溶胶递增相吻合,这说明气溶胶的增加抑制了地形云降水。 R_0 的递减主要是减少了中小雨的天数,这种影响对浅薄的生命期较短的地形云降水作用更明显。

(3) Saleeby et al. (2005) 用 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) 中尺度数值模式研究了科罗拉多州冬季地形云降水,结果显示,高浓度 CCN 产生大量小云滴,减缓冰晶的淞附过程,使地面总降水量减少。在 CCN 浓度高的环境中, GCCN 浓度增加可使碰并增长加快,地面降水增加,而在 CCN 浓度低的环境中, GCCN 浓度增加使得液滴活化、冰晶生长和水汽凝华增长共同争食有效的水汽,地面降水减小(陈宝君和肖辉, 2007; Chen and Xiao, 2009)。Teller and Levin (2006) 对此给出的解释是:因为高浓度的小云滴蒸发快,冰晶通过消耗云水而增长(贝吉龙过程),云中液态水含量减小,淞附增长减慢。Reisin et al. (1996a) 和 Rasmussen et al. (2002) 用 MM5 模式耦合分档微物理过程研究发现,低浓度气溶胶环境中,冻毛毛雨数量增加,云中液态水含量高,云体停留时间长,云中冰晶数量少 ($< 0.08 \text{ L}^{-1}$)。Lynn et al. (2007) 用 WRF 模式耦合分档微物理模式研究发现,大气动力和环境状况(如水平风速、相对湿度)对气溶胶影响降水有十分重要的作用。

4.3.2 极地层云

近年来,人们对污染气溶胶怎样影响极地层云降水的问题有了较多的关注。极地层云和地形云有相同的特性,液态水含量低,维持时间长。模式研究认为,污染气溶胶对极地层云降水有影响。Cotton et al. (2003)、Saleeby and Cotton (2004) 和 Carriö et al. (2005a, 2005b) 等用

RAMS 模式研究极地边界层云发现, 增加冰核 (IN) 浓度, 云中液态水含量减少, 而冰晶含水量增加, 冰晶维持时间增长, 冷凝物路径增长 (积分含水量增大), 向下的长波辐射增强, 冰晶下落速度减小, 降水率减小; 增加 CCN 浓度, 云反射率增强, 但地面的净辐射仍然很大, 海冰融化速度增大。总之, 在逆温层下污染气溶胶增加可加速海冰的融化速度, 和清洁大气环境相比, 边界层之上环境污染时, 海冰融化速度增加 4%。

5 结论与讨论

综上所述, 可以得到以下结论:

(1) 气溶胶影响云覆盖面积、尺度和液态水路径 (LWP), 定量估计气溶胶对云宏观特性的影响尚十分困难。当气溶胶浓度增加时: 卫星观测到低层云覆盖面积增大, 而大涡模式模拟得到层状云覆盖面积减小; 海洋性信风积云单体云量减小, 但多单体对流云系云量增加; 层积云中的 LWP 增加、减少或保持不变。当吸收性气溶胶浓度增加时: 边界层云覆盖面积减小, 可能加速边界层云消亡; 覆盖面积大的信风积云中 LWP 减少。吸收性气溶胶和边界层云中液态水路径呈非线性关系。

(2) 气溶胶影响云微观物理。观测和模式模拟证实, 当气溶胶浓度增大时, 云凝结核和云滴浓度增加, 云滴尺度减小, 因此, 雨滴碰并增长效率降低, 云滴向降水粒子的转化效率减小, 云滴在云中的滞留时间增长。气溶胶浓度增大时, 对流云中冰晶数量随高度增加, 但冰晶生成效率降低。冰雹生成对初始 CCN、IN 浓度十分敏感, 冰核直接影响云中的冰相过程, 进而影响降水和降雹。GCCN 在降水形成中可以充当很好的碰并胚胎, 对云微物理过程有重要作用, 它可以使大云滴浓度增大, 含水量增加, 滴谱展宽。

(3) 气溶胶对降水的影响过程复杂, 很难建立 CCN 和降水的确切关系。总的来说, 随着气溶胶浓度上升, 降水过程受到抑制, 降水量趋向减少, 但也存在降水增加的个例。气溶胶对降水的影响因地区而异, 与云体污染程度、云的类型有关。受动力过程的影响, 对流层中层气溶胶的二次释放显著影响深对流云降水, 可以抑制对流,

如果忽略这个过程, 对流云降水量可能增加 50%。沙尘气溶胶使多单体对流云系内上升气流、冰晶化过程加强、含水量增加, 对流云发展旺盛。GCCN 在高浓度 CCN 环境中可增加降水。污染气溶胶对地形云降水影响较大, 每年可以减少地形云降水量 30%。可能的解释是污染气溶胶增加, 小云滴数浓度增加, 蒸发快, 雪粒子淞化过程减慢, 降雪量减少的缘故, 但还有很多不确定性。

气溶胶对云和降水的影响非常复杂, 它充当云凝结核、冰核, 其中包括巨核。气溶胶通过影响云微物理特性来影响云和降水过程, 或者云和降水的变化, 是气溶胶与云中热力、动力过程相互作用的结果, 涉及大量的物理化学过程, 因此, 气溶胶对云和降水的影响应该与云本身状态和环境条件有关, 目前研究所获得的一些结论也是有条件才成立的。例如, 气溶胶对云尺度、含水量的作用就有不确定性, 它不仅与云类型有关, 与不同地区有关, 还与环境污染程度有关。由此可以认为, 气溶胶对云宏观特性和降水的影响仍然是值得继续研究或者说值得深入研究的科学问题。具体而言:

1) 要专门对不同地区、不同环境下的气溶胶进行观测, 获得环境大气中气溶胶空间分布、尤其是垂直分布的廓线, 进而研究不同类型核 (CCN、IN) 的垂直分布, 为研究气溶胶对云宏观特性和降水的影响提供实际资料。针对气溶胶对云宏观结构和降水影响的多样性开展研究。研究不同来源气溶胶 (如, 生物质燃烧产生的气溶胶、沙尘气溶胶及工业排放的污染气溶胶等) 对云和降水影响, 研究不同地区不同天气条件下气溶胶对云和降水的影响, 进一步研究滞留空中的云粒子蒸发产生的气溶胶对云和降水的影响。

2) 气溶胶对云和降水的影响研究要与云和降水形成的微物理机制相联系, 为进一步研究云中微物理量与地面降水的非线性关系以及气溶胶与云和降水相互作用的定量关系打下基础。气溶胶对云中微物理量和地面降水的非线性关系还存在很大的不确定性。环境场 (大气稳定度、风场切变、云与中尺度环境场交换等) 对云与气溶胶的相互作用有重要影响, 在这种情形下, 增加 CCN 浓度对地面降水的影响很难确定。模拟表明, 对一个发展的对流云, 增加 CCN 浓度可能增加也可

能抑制降水,因此,需要有更多的观测和数值模拟,建立气溶胶对云及降水影响的物理过程关系。

3) 要将气溶胶纳入云的微物理过程与动力、热力过程相互作用系统,加强气溶胶对强风暴影响的研究。不同环境条件下气溶胶对云动力场的影响也存在很大的不确定性。模式模拟显示,气溶胶通过云下冷池和重力沉降而产生二次动力反馈过程影响降水。目前,人们对气溶胶—云滴的相互作用了解较多,但对气溶胶—冰晶的相互作用了解较少,污染气溶胶对降水(尤其是云中冰晶过程影响的降水)的作用还很难估计。因此,要结合观测分析、数值模拟及统计分析方法对这些问题加以研究,比如,利用飞机、卫星、地面雷达以及微波辐射计等多种先进的探测手段对不同地区不同类型的云进行大量的观测分析,结合数值模式研究改变污染气溶胶数量及特性之后观察云系的反应,再运用现有的和新的统计方法对已有资料进行分析,建立气溶胶对云动力场、微物理场和降水的影响关系。

4) 已有研究显示,气溶胶(CCN、GCCN、IN)对浅对流云、深对流云、多单体风暴、地形云、层积混合云等都有重要影响。针对我国情况,开展气溶胶对对流云、地形云及层积混合云影响的观测及数值模拟研究很少。尤其是,关于气溶胶对多单体风暴的影响的研究更少。因此,应该广泛的运用地面、飞机、卫星、雷达观测这些类型的云结构和降水,同时,建立更加完善的数值模式,考虑更加详细的气溶胶—云—降水物理过程,对气溶胶—云—降水相互作用机理进行更加深入的研究。

5) 水资源是一个备受关注的社会问题。有些地区干旱缺水,而有些地区经常有洪涝灾害。污染气溶胶可以影响云的宏微观物理结构,进而影响降水。然而,一个区域降水量的增加或减少可能影响下风方向的降水量,雨量分布的变化对缺水的半干旱地区和干旱地区尤其有明显的影响。此外,人们对气溶胶对雨水、雪花和冰雹形成的影响机制了解还很少。因此,研究气溶胶对云宏微观物理结构和降水的影响具有十分重要的意义。

6) 巨核(GCCN)在污染大气中对降水的产生有重要作用。GCCN和云中液态含水量增长率、云滴数浓度和液态含水量增长时间等呈非线性关

系,但到目前为止,还不能给出明确的定量结果。因此,研究巨核在云中产生的微物理过程,巨核对云粒子谱、含水量和云中微物理过程的影响,进而研究在特定条件下,巨核与地面降水的定量关系是一个重要的课题。近年来,在污染环境条件下吸湿性粒子或盐核作为人工增加降水的有效途径已经受到人们重视,应该加强模式研究,明确针对不同天气降水过程需要播撒多大尺度和大量的吸湿性粒子或盐核,才能有效地增加当地的降水,这种增加对下游和上游的降水分布有何影响,影响的时效有多长,范围多大。

总而言之,气溶胶—云—降水相互作用是当今大气科学研究的热点和前沿问题。在气溶胶对云宏微观结构和降水影响的研究中加强对云和环境的综合探测,了解和掌握云和环境相关物理参数,将气溶胶影响的研究深化为定量研究,这对人工影响天气、天气及气候预测研究都有重要的促进作用。

参考文献 (References)

- Abdul-Razzak H, Ghan S J. 2000. A parameterization of aerosol activation 2. Multiple aerosol types [J]. *J. Geophys. Res.* 105 (5): 6837–6844.
- Ackerman A S, Kirkpatrick M P, Stevens D E, et al. 2004. The impact of humidity above stratiform clouds on indirect aerosol climate forcing [J]. *Nature*, 432 (7020): 1014–1017.
- Albrecht B A. 1989. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness [J]. *Science*, 245 (4923): 1227–1230.
- Andreae M O, Rosenfeld D, Artaxo P, et al. 2004. Smoking rain clouds over the Amazon [J]. *Science*, 303 (5662): 1337–1342.
- Baker M B, Latham J. 1979. The evolution of droplet spectra and the rate of production of embryonic raindrops in small cumulus clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 36 (8): 1612–1615.
- Baker M B, Corbin R, Latham J. 1980. The influence of entrainment on the evolution of cloud droplet spectra: I. A model of inhomogeneous mixing [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106: 581–598.
- Borys R, Lowenthal D, Mitchell D. 2000. The relationship among cloud microphysics, chemistry, and precipitation rate in cold mountain clouds [J]. *Atmos. Environ.*, 34 (16): 2593–2602.
- Borys R, Lowenthal D, Cohn S, et al. 2003. Mountaintop and radar measurements of anthropogenic aerosol effects on snow growth and snowfall rate [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (10): 1538.
- Brenguier J L, Chuang P Y, Fouquart Y, et al. 2000a. An over-

- view of the ACE-2 CLOUDYCOLUMN closure experiment [J]. *Tellus B*, 52 (2): 815–827.
- Brenguier J L, Pawlowska H, Schüller L, et al. 2000b. Radiative properties of boundary layer clouds: Droplet effective radius versus number concentration [J]. *J. Atmos. Sci.*, 57 (6): 803–821.
- Breon F M, Tanre D, Generoso S. 2002. Aerosol effect on cloud droplet size monitored from satellite [J]. *Science*, 295 (5556): 834.
- Burnet F, Brenguier J L. 2007. Observational study of the entrainment-mixing process in warm convective clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 64 (6): 1995–2011.
- Carriö G G, Jiang H, Cotton W R. 2005a. Impact of aerosol intrusions on arctic boundary layer clouds. Part I: 4 May 1998 case [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (9): 3082–3093.
- Carriö G G, Jiang H, Cotton W. 2005b. Impact of aerosol intrusions on Arctic boundary layer clouds. Part II: Sea ice melting rates [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (9): 3094–3105.
- Changnon Jr S. 1980. More on the La Porte anomaly: A review [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 61 (7): 702–711.
- 陈宝君, 吴海英, 曾明剑, 等. 2005a. 南京“03.7”大暴雨中云物理过程的数值模拟研究 [J]. *气象科学*, 25 (1): 26–31.
- Chen Baojun, Wu Haiying, Zeng Mingjian, et al. 2005a. Modeling study of cloud and precipitation physical processes of the 5 July 2003 heavy rainfall in Nanjing [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 25 (001): 26–31.
- 陈宝君, 周德平, 宫福久, 等. 2005b. 2002 年 7 月沈阳一次降水过程的催化数值模拟研究 [J]. *南京气象学院学报*, 28 (4): 483–491.
- Chen Baojun, Zhou Deping, Gong Fujiu, et al. 2005. AgI-seeding modeling study on the 12 July 2002 [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 28 (4): 483–491.
- 陈宝君, 肖辉. 2007. 过冷雨水低含量条件下冰雹形成和增长机制及其催化效果的数值模拟 [J]. *大气科学*, 31 (2): 273–290.
- Chen Baojun, Xiao Hui. 2007. Numerical simulation of hail formation and growth in a storm with low supercooled rain water content and the effect of AgI seeding on hail suppression [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 31 (2): 273–290.
- Chen B J, Xiao H. 2009. Silver iodide seeding impact on the microphysics and dynamics of convective clouds in the high plains [J]. *Atmos. Res.*, doi: 10.1016/j.atmosres.2009.04.001
- 陈丽, 银燕, 杨军, 等. 2007. 沙尘气溶胶对云和降水影响的模拟研究 [J]. *南京气象学院学报*, 30 (5): 590–600.
- Chen Li, Yin Yan, Yang Jun, et al. 2007. Effects of sand dust particles on cloud and precipitation: A numerical study [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 30 (5): 590–600.
- 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 Li, Yin Yan. 2008. Numerical simulations for the thermal impact of the long-rang transport of mineral aerosols [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (3): 628–636.
- 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制 [J]. *气象学报*, 62 (5): 634–646.
- Chen Longxun, Zhou Xiuji, Li Weiliang, et al. 2004. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (5): 634–646.
- Cheng Y, Carri G G, Cotton W R, et al. 2009. Influence of cloud condensation and giant cloud condensation nuclei on the development of precipitating trade wind cumuli in a large eddy simulation [J]. *J. Geophys. Res.*, 114 (D8): D08201.
- Cheng Y, Lohmann U, Zhang J, et al. 2005. Contribution of changes in sea surface temperature and aerosol loading to the decreasing precipitation trend in southern China [J]. *J. Climate*, 18: 1381–1390.
- Choi Y S, Ho C H, Kim J Y, et al. 2008. The impact of aerosols on the summer rainfall frequency in China [J]. *J. Appl. Meteor.*, 47 (6): 1802–1813.
- Chuang P Y. 2003. Measurement of the timescale of hygroscopic growth for atmospheric aerosols [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D9): 4282.
- Coakley Jr A J, Walsh C D. 2002. Limits to the aerosol indirect radiative effect derived from observations of ship tracks [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59 (3): 668–680.
- Cooper W A, Bruinjes R T, Mather G K. 1997. Calculations pertaining to hygroscopic seeding with flares [J]. *J. Appl. Meteor.*, 36 (11): 1449–1469.
- Cotton W R, Pielke Sr R A, Walko R L, et al. 2003. RAMS 2001: Current status and future directions [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 82 (1): 5–29.
- Cotton W R, Zhang H N, McFarquhar G M, et al. 2007. Should we consider polluting hurricanes to reduce their intensity [J]. *Journal of Weather Modification*, 39: 70–73.
- Cruz C N, Pandis S N. 1998. The effect of organic coatings on the cloud condensation nuclei activation of inorganic atmospheric aerosol [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (11): 13111
- 戴进, 余兴, Rosenfeld D, et al. 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.
- 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.
- Danielsen E F. 1997. Inherent difficulties in hail probability prediction [J]. *Meteor. Monogr.*, 38: 135–143.
- 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]. *Advances in Earth Science*, 23 (3): 252–261.
- Eagan R C, Hobbs P V, Radke L F. 1974. Measurements of cloud condensation nuclei and cloud droplet size distributions in the vic-

- inity of forest fires [J]. *J. Appl. Meteor.*, 13 (5): 553–557.
- Feingold G, Cotton W R, Kreidenweis S M, et al. 1999. The impact of giant cloud condensation nuclei on drizzle formation in stratocumulus: Implications for cloud radiative properties [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56 (24): 4100–4117.
- Feingold G, Jiang H, Harrington J. 2005. On smoke suppression of clouds in Amazonia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L02804. 1–L02804. 4.
- 鄯大雄, 陈汝珍. 1994. 黄土高原尘沙作为大气冰核的实验研究 [J]. *应用气象学报*, 5 (2): 129–134. Feng Daxiong, Chen Ruzhen. 1994. A laboratory study on the role of the loess particles as natural ice nuclei [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 5 (2): 129–134.
- Fridlind A M, Ackerman A S, Jensen E J, et al. 2004. Evidence for the predominance of mid-tropospheric aerosols as subtropical anvil cloud nuclei [J]. *Science*, 304 (5671): 718.
- Garrett T J, Hobbs P V. 1995. Long-range transport of continental aerosols over the Atlantic Ocean and their effects on cloud structures [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52 (16): 2977–2984.
- Givati A, Rosenfeld D. 2004. Quantifying precipitation suppression due to air pollution [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43 (7): 1038–1056.
- Griffith D A, Solak M E, Yorty D P. 2005. Is air pollution impacting winter orographic precipitation in Utah. Weather modification association? [J]. *Journal of Weather Modification*, 37: 14–20.
- Gultepe I, Isaac G A, Leitch W R, et al. 1996. Parameterizations of marine stratus microphysics based on in situ observations: Implications for GCMs [J]. *J. Climate*, 9 (2): 345–357.
- 顾震潮. 1980. 云雾降水物理基础 [M] 北京: 科学出版社, 5–10. Gu Zhenchao. 1980. Bases of Cloud and Mist Precipitation Physics [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 5–10.
- Han Q, Rossow W B, Lacis A A. 1994. Near-global survey of effective cloud droplet radii in liquid water clouds using ISCCP data [J]. *J. Climate*, 7: 465–497.
- Han Q, Rossow W B, Zeng J, et al. 2002. Three different behaviors of liquid water path of water clouds in aerosol-cloud interactions [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59 (3): 726–735.
- Hindman E. 1975. The nature of aerosol particles from a paper mill and their effects on clouds and precipitation [D]. Ph. D. dissertation, University of Washington.
- Hindman E E, Tag P M, Silverman B A, et al. 1977. Cloud condensation nuclei from a paper mill. Part II: Calculated effects on rainfall [J]. *J. Appl. Meteor.*, 16 (7): 753–755.
- Hobbs P V, Radke L F, Shumway S E. 1970. Cloud condensation nuclei from industrial sources and their apparent influence on precipitation in Washington State [J]. *J. Atmos. Sci.*, 27 (1): 81–89.
- Huang J, Lin B, Minnis P, et al. 2006a. Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L19802, doi: 10.1029/2006GL026561.
- Huang J, Minnis P, Lin B, et al. 2006b. Possible influences of Asian dust aerosols on cloud properties and radiative forcing observed from MODIS and CERES [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L06824, doi: 10.1029/2005GL024724.
- 黄梦宇, 赵春生, 周广强, 等. 2005. 华北地区层状云微物理特性及气溶胶对云的影响 [J]. *南京气象学院学报*, 28 (3): 360–368. Huang Mengyu, Zhao Chunsheng, Zhou Guangqiang, et al. 2005. Stratus cloud microphysical characters over North China region and the relationship between aerosols and clouds [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 28 (3): 360–368.
- 黄蔚薇, 杨军, 凌士兵, 等. 2007. 沙尘气溶胶粒子表面变性对云滴形成过程的影响 [J]. *南京气象学院学报*, 30 (2): 210–215. Huang Weiwei, Yang Jun, Ling Shibing, et al. 2007. Effects of the heterogeneous-phase chemical processes on mineral aerosols on the growth of cloud droplets [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 30 (2): 210–215.
- Huang Y, Dickinson R E, Chameides W L. 2006. Impact of aerosol indirect effect on surface temperature over East Asia [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103 (12): 4371–4376.
- Jiang H L, Feingold G, Cotton W R. 2002. Simulations of aerosol-cloud-dynamical feedbacks resulting from entrainment of aerosol into the marine boundary layer during the Atlantic Stratocumulus Transition Experiment [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D24): 4813.
- Jiang H, Feingold G. 2006. Effect of aerosol on warm convective clouds: Aerosol-cloud-surface flux feedbacks in a new coupled large eddy model [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (D1), D01202, doi: 10.1029/2001JD001502.
- Jirak I L, Cotton W R. 2006. Effect of air pollution on precipitation along the Front Range of the Rocky Mountains [J]. *J. Appl. Meteor.*, 45 (1): 236–245.
- Johnson B T, Shine K P, Forster P M. 2004. The semi-direct aerosol effect: Impact of absorbing aerosols on marine stratocumulus [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 130 (599): 1407–1422.
- Johnson B T. 2005. Large-eddy simulations of the semidirect aerosol effect in shallow cumulus regimes [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D14), D14206.
- Johnson D B. 1976. Ultragraining Urban Aerosol Particles [J]. *Science*, 194 (4268): 941.
- Johnson D B. 1982. The role of giant and ultragraining aerosol particles in warm rain initiation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 39 (2): 448–460.
- 康凤琴, 银燕, 张逸轩. 2009. 中国北方沙尘气溶胶对云和降水影响的数值模拟研究 [J]. *气象*, 35 (6): 36–45. Kang Fengqin, Yin Yan, Zhang Yixuan. 2009. A numerical study of effects of mineral dust particles on cloud and precipitation in the northwest

- China [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 35 (6): 36–45.
- Kaufman Y J, Nakajima T. 1993. Effect of Amazon smoke on cloud microphysics and albedo-analysis from satellite imagery [J]. *J. Appl. Meteor.*, 32 (4): 729–744.
- Kaufman Y J, Boucher O, Tanr   D, et al. 2005a. Aerosol anthropogenic component estimated from satellite data [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: 17.
- Kaufman Y J, Koren I, Remer L A, et al. 2005b. The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud development over the Atlantic Ocean [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102 (32): 11207.
- Khain A, Pokrovsky A, Sednev I. 1999. Some effects of cloud aerosol interaction on cloud microphysics structure and precipitation formation: Numerical experiments with a spectral microphysics cloud ensemble model [J]. *Atmos. Res.*, 52 (3): 195–220.
- Khain A, Ovtchinnikov M, Pinsky M, et al. 2000. Notes on the state-of-the-art numerical modeling of cloud microphysics [J]. *Atmos. Res.*, 55 (3–4): 159–224.
- Khain A, Rosenfeld D, Pokrovsky A. 2001. Simulating convective clouds with sustained supercooled liquid water down to -37.5°C using a spectral microphysics model [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (20): 3887–3890.
- Khain A, Pokrovsky A, Pinsky M, et al. 2004. Simulation of effects of atmospheric aerosols on deep turbulent convective clouds using a spectral microphysics mixed-phase cumulus cloud model. Part I: Model description and possible applications [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61 (24): 2963–2982.
- Khain A, Rosenfeld D, Pokrovsky A. 2005. Aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131 (611), doi: 10.1256/qj.04.62.
- Koren I, Kaufman Y J, Remer L A, et al. 2004. Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation [J]. *Science*, 303 (5662): 1342.
- Koren I, Kaufmann Y J, Rosenfeld D, et al. 2005. Aerosol invigoration and restructuring of Atlantic convective clouds [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L14828, doi: 10.1029/2005GL023187.
- Latham J, Reed R L. 1977. Laboratory studies of the effects of mixing on the evolution of cloud droplet spectra [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 103: 297–306.
- Levin Z, Ganor E. 1996. The effects of desert particles on cloud and rain formation in the eastern Mediterranean [C] // Guerzoni S, Chester R. *The Impact of Desert Dust across the Mediterranean*. London: Kluwer Academic Publisher, 77–86.
- Levin Z, Teller A, Ganor E, et al. 2005. On the interactions of mineral dust, sea-salt particles, and clouds: A measurement and modeling study from the Mediterranean Israeli Dust Experiment campaign [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D20), D20202, doi: 10.1029/2005JD005810.
- Li J, Mao J T, Hu Z J, et al. 2004. Numerical simulation experiments for the effect of changes of atmospheric nuclei concentrations on radiant properties of cloud [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 62: 77–86.
- Lin J C, Matsui T, Pielke Sr R A, et al. 2006. Effects of biomass-burning-derived aerosols on precipitation and clouds in the Amazon Basin: A satellite-based empirical study [J]. *J. Geophys. Res.*, 111, D19204, doi: 10.1029/2005JD006884.
- Liu Q, Kogan Y L, Lilly D K, et al. 2000. Modeling of ship effluent transport and its sensitivity to boundary layer structure [J]. *J. Atmos. Sci.*, 57 (16): 2779–2791.
- Lohmann U. 2002. A glaciation indirect aerosol effect caused by soot aerosols [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (4): 1052–1055.
- Lu M L, Seinfeld J H. 2005. Study of the aerosol indirect effect by large-eddy simulation of marine stratocumulus [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (11): 3909–3932.
- Lynn B H, Khain A, Dudhia J, et al. 2005. Spectral (bin) microphysics coupled with a mesoscale model (MM5). Part II: Simulation of a CaPE rain event with a squall line [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 133 (1): 59–71.
- Lynn B H, Khain A, Rosenfeld D, et al. 2007. Effects of aerosols on precipitation from orographic clouds [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, D10225, doi: 10.1029/2006JD007537.
- Ma J Z, Guo X, Zhao C, et al. 2007. Recent progress in cloud physics research in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24 (6): 1121–1137.
- 毛节泰, 张军华, 王美华. 2002. 中国大气气溶胶研究综述 [J]. *气象学报*, 60 (5): 625–634.
- Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. 2002. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 60 (5): 625–634.
- Mather G K. 1991. Coalescence enhancement in large multicell storms caused by the emissions from a Kraft paper mill [J]. *J. Appl. Meteor.*, 30 (8): 1134–1146.
- McFiggans G, Artaxo P, Baltensperger U. 2005. The effect of physical and chemical aerosol properties on warm cloud droplet activation [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 5 (5): 8507–8647.
- Meyers M P, DeMott P J, Cotton W R. 1992. New primary ice-nucleation parameterizations in an explicit cloud model [J]. *J. Appl. Meteor.*, 31 (7): 708–721.
- Nelson R, Gokhale N. 1968. Concentrations of giant particles below cloud bases [R]. Preprints, First National Conf. on Weather Modification, Albany, NY, Amer. Meteor. Soc., 89–98.
- O'DOWD C, Lowe J A, Smith M H, et al. 1999. The relative importance of non-sea-salt sulphate and sea-salt aerosol to the marine cloud condensation nuclei population: An improved multi-component aerosol-cloud droplet parametrization [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125 (556): 1295–1313.
- Phillips V T J, Choularton T W, Blyth A M, et al. 2002. The influence of aerosol concentrations on the glaciation and precipitati-

- on of a cumulus cloud [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 128 (581): 951–971.
- Platnick S, Durkee P, Nielsen K, et al. 2000. The role of background cloud microphysics in the radiative formation of ship tracks [J]. *J. Atmos. Sci.*, 57 (16): 2607–2624.
- Pruppacher H, Klett J. 1978. *Microphysics of Clouds and Precipitation* [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 714pp.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001a. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 294 (5549): 2119.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Lelieveld J, et al. 2001b. Indian Ocean experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo–Asian haze [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 371–398.
- Rasmussen R M, Geresdi I, Thompson G, et al. 2002. Freezing drizzle formation in stably stratified layer clouds: The role of radiative cooling of cloud droplets, cloud condensation nuclei, and ice initiation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59 (4): 837–860.
- Reisin T, Levin Z, Tzivion S. 1996a. Rain production in convective clouds as simulated in an axisymmetric model with detailed microphysics. Part I: Description of the model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 53 (3): 497–519.
- Reisin T, Levin Z, Tzivion S. 1996b. Rain production in convective clouds as simulated in an axisymmetric model with detailed microphysics. Part II: Effects of varying drops and ice initiation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 53 (13): 1815–1837.
- Remer L A, Kaufman Y Z, Levin Z, et al. 2002. Model assessment of the ability of MODIS to measure top-of-atmosphere direct radiative forcing from smoke aerosols [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59 (3): 657–667.
- Rosenfeld D, Lensky I. 1998. Satellite based insights into precipitation formation processes in continental and maritime convective clouds [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79: 2457–2476.
- Rosenfeld D. 1999. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (20): 3105–3108.
- Rosenfeld D. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. *Science*, 287 (5459): 1793.
- Rosenfeld D, Givati A. 2006. Evidence of orographic precipitation suppression by air pollution induced aerosols in the western US [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 45: 893–911.
- Rosenfeld D, Woodley W L, Krauss T, et al. 2006. Aircraft microphysical documentation from cloud base to anvils of hailstorm feeder clouds in Argentina [J]. *J. Appl. Meteor.*, 45 (9): 1261–1281.
- Rosenfeld D. 2006a. Aerosol-cloud interactions control of earth radiation and latent heat release budgets [J]. *Space Science Reviews*, 125 (1): 149–157.
- Rosenfeld D. 2006b. Aerosols, clouds, and climate [J]. *Science*, 312: 1323–1324.
- Rosenfeld D, Dai J, Yu X, et al. 2007. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation [J]. *Science*, 315 (5817): 1396.
- Rudich Y, Khersonsky O, Rosenfeld D. 2002. Treating clouds with a grain of salt [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (22): 2060–2063.
- Saleeby S M, Cotton W R. 2004. A large-droplet mode and prognostic number concentration of cloud droplets in the Colorado State University Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). Part I: Module descriptions and supercell test simulations [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43 (1): 182–195.
- Saleeby S M, Fort Collins C, Cotton W R. 2005. Modeled sensitivity of wintertime precipitation to CCN and GCCN concentrations [R]. 16th Conference on Planned and Inadvertent Weather Modification.
- Segal Y, Khain A, Pinsky M, et al. 2004. Effects of hygroscopic seeding on raindrop formation as seen from simulations using a 2000-bin spectral cloud parcel model [J]. *Atmos. Res.*, 71 (1–2): 3–34.
- Seifert A, Beheng K D. 2006a. A two-moment cloud microphysics parameterization for mixed-phase clouds. Part 1: Model description [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 92 (1): 45–66.
- Seifert A, Beheng K D. 2006b. A two-moment cloud microphysics parameterization for mixed-phase clouds. Part 2: Maritime vs. continental deep convective storms [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 92 (1): 67–82.
- 石安英. 1980. 大气中的冰核与雪晶 [M]. 石家庄: 河北人民出版社, 126–130. Shi Anying. 1980. Ice nuclei and Snow crystal in the atmosphere (in Chinese) [M]. Shijiazhuang: Hebei People's Publishing House, 126–130.
- Snider J S, Brenguier J L. 2000. Cloud condensation nuclei and cloud droplet measurements during ACE-2 [J]. *Tellus B*, 52 (2): 828–842.
- Squires P, Twomey T. 1961. The relation between cloud drop numbers and the spectrum of cloud nuclei [J]. *Physics of Precipitation, Monograph*, 5: 211–219.
- Takahashi T. 1976. Hail in an axisymmetric cloud model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 33 (8): 1579–1601.
- Tanrè D, Kaufman Y, Herman M, et al. 1997. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS. EOS spectral radiances [J]. *J. Geophys. Res.*, 102 (16): 971–988.
- Taylor J P, McHaffie A. 1994. Measurements of cloud susceptibility [J]. *J. Atmos. Sci.*, 51 (10): 1298–1306.
- Teller A, Levin Z. 2006. The effects of aerosols on precipitation and dimensions of subtropical clouds: a sensitivity study using a numerical cloud model [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 6 (1): 67–80.
- Trochkin D, Iwasaka Y, Matsuki A, et al. 2003. Comparison of the chemical composition of mineral particles collected in Dunhuang, China and those collected in the free troposphere over Ja-

- pan: possible chemical modification during long-range transport [J]. *Water, Air and Soil Pollution Focus*, 3: 161 – 172.
- Twomey S. 1977. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 34 (7): 1149 – 1152.
- Van Den Heever S C, Carriö G G, Cotton W R, et al. 2006. Impacts of nucleating aerosol on Florida storms. Part I: Mesoscale simulations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63 (7): 1752 – 1775.
- 王春明, 叶家东. 1997. 气溶胶浓度影响暖雨过程的数值模拟试验 [J]. *气象科学*, 17 (4): 316 – 324. Wang Chunming, Ye Jia-dong. 1997. A numerical experiment of aerosol concentration affecting warmrain process [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 17 (4): 316 – 324.
- Wang S P, Wang Q, Feingold G. 2003. Turbulence, condensation, and liquid water transport in numerically simulated nonprecipitating stratocumulus clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 60 (2): 262 – 278.
- 汪学林, 张万钧, 熊尚清. 1965. 白城地区春季的大气冰核 [J]. *气象学报*, 35 (3): 223 – 239. Wang Xuelin, Zhang Wan-jun, Xiong Shangqing. 1965. Ice nuclei concentration in spring of Baicheng Area [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 35 (3): 223 – 239.
- Warner J, Twomey S. 1967. The production of cloud nuclei by cane fires and the effect on cloud droplet concentration [J]. *J. Atmos. Sci.*, 24 (6): 704 – 706.
- Warner J. 1968. A reduction in rainfall associated with smoke from sugar-cane fires—An inadvertent weather modification? [J]. *J. Appl. Meteor.*, 7 (2): 247 – 251.
- Warner J. 1971. Smoke from sugar-cane fires and rainfall [J]. *J. Appl. Meteor.*, 7: 191 – 192.
- Warren S G, Hahn C J, London J, et al. 1986. Global distribution of total cloud cover and cloud type amounts over land [R]. NCAR Tech. Note TN-273+ STR. Boulder, CO, 29.
- Wetzel M A, Stowe L L. 1999. Satellite-observed patterns in stratus microphysics, aerosol optical thickness, and shortwave radiative forcing [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D24), doi: 10.1029/1999JD900922.
- Woodcock A K. 1953. Salt nuclei in marine air as a function of altitude and wind force [J]. *J. Atmos. Sci.*, 10 (5): 362 – 371.
- Woodcock A K, Duce R A, Moyers J L. 1971. Salt particles and raindrops in Hawaii [J]. *J. Atmos. Sci.*, 28 (7): 1252 – 1257.
- 肖辉, 徐华英, 黄美元. 1988a. 积云中云滴谱形成的数值模拟研究 (一)——盐核谱和浓度的作用 [J]. *大气科学*, 12 (2): 143 – 157. Xiao Hui, Xu Huaying, Huang Meiyuan. 1988a. Numerical study on the formation of cloud droplet spectra in cumulus clouds. Part I. The roles of spectra and concentration of salt nuclei [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 12 (2), 143 – 157.
- 肖辉, 徐华英, 黄美元. 1988b. 积云中云滴谱形成的数值模拟研究 (二)——各种碰并过程, 大气层结等的作用 [J]. *大气科学*, 12 (3): 343 – 353. Xiao Hui, Xu Huaying, Huang Meiyuan. 1988b. Numerical study on the formation of cloud droplet spectra in cumulus clouds. Part II. The roles of various collection processes, atmospheric stratification and others [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 12 (3): 343 – 353.
- Xiao H, Carmichael G R, Durchenwald J, et al. 1997. Long-range transport of SO_x and dust in East Asia during the PEM B experiment [J]. *J. Geophys. Res.*, 102 (D23): 28589 – 28612.
- 徐小红, 余兴, 戴进. 2009. 气溶胶对秦岭山脉地形云降水的影响 [J]. *气象*, 35 (1): 37 – 47. Xu Xiaohong, Yu Xing, Dai Jin. 2009. Effect of aerosol on orographic precipitation [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 35 (1): 37 – 47.
- Xue H, Feingold G. 2006. Large-eddy simulations of trade wind cumuli: Investigation of aerosol indirect effects [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63 (6): 1605 – 1622.
- Yin Y, Levin Z, Reisin T G, et al. 2000a. The effects of giant cloud condensation nuclei on the development of precipitation in convective clouds—a numerical study [J]. *Atmos. Res.*, 53 (1–3): 91 – 116.
- Yin Y, Levin Z, Reisin T G, et al. 2000b. The effects of giant cloud condensation nuclei on the development of precipitation in convective clouds a numerical study [J]. *Atmos. Res.*, 53 (1–3): 91 – 116.
- Yin Y, Levin Z, Reisin T G, et al. 2000c. Seeding convective clouds with hygroscopic flares: Numerical simulations using a cloud model with detailed microphysics [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39 (9): 1460 – 1472.
- Yin Y, Wurzler S, Levin Z, et al. 2002. Interactions of mineral dust particles and clouds: Effects on precipitation and cloud optical properties [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D23): 4724 – 4737.
- Yin Y, Carslaw K S, Feingold G. 2005. Vertical transport and processing of aerosols in a mixed-phase convective cloud and the feedback on cloud development [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131 (605): 221 – 245.
- 游来光, 杨绍忠. 2002. 1995 和 1996 年春季北京地区大气冰核浓度的观测与研究 [J]. *气象学报*, 60 (1): 101 – 109. You Laiguang, Yang Shaozhong. 2002. Study of ice nuclei concentration at Beijing in spring of 1995 and 1996 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 60 (1): 101 – 109.
- 张杰, 李文莉, 康凤琴, 等. 2004. 一次冰雹云演变过程的卫星遥感监测与分析 [J]. *高原气象*, 23 (6): 758 – 763. Zhang Jie, Li Wenli, Kang Fengqin, et al. 2004. Analysis and satellite monitor of a developing process of hail cloud [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 23 (6): 758 – 763.
- Zhang J, Lohmann U, Stier P. 2005. A microphysical parameterization for convective clouds in the ECHAM5 climate model: Single-column model results evaluated at the Oklahoma Atmospheric Radiation Measurement Program site [J]. *J. Geophys. Res.*, 110, D15S07, doi: 10.1029/2004JD005128.
- Zhao C S, Ishizaka Y, Peng D. 2005. Numerical study on impacts of multi-component aerosols on marine cloud microphysical prop-

- erties [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 83: 977–986.
- 赵春生, 彭大勇, 段英. 2005. 海盐气溶胶和硫酸盐气溶胶在云微物理过程中的作用 [J]. 应用气象学报, 16 (4): 417–425.
- Zhao Chunsheng, Peng Dayong, DuanYing. 2005. The impacts of sea-salt and nss-sulfate aerosols on cloud microproperties [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (4): 417–425.
- Zhao C S, Tie X X, Lin Y. 2006a. A possible positive feedback of reduction of precipitation and increase in aerosols over eastern central China [J]. Geophys. Res. Lett., 33., L11814, doi: 10.1029/2006GL025959
- Zhao C S, Tie X X, Brasseur G, et al. 2006b. Aircraft measurements of cloud droplet spectral dispersion and implications for indirect aerosol radiative forcing [J]. Geophys. Res. Lett., 33: L16809, doi: 10.1029/2006GL026653.
- 赵剑平. 1965. 我国北部地区大气冰核观测的分析和研究 [J]. 气象学报, 35 (4): 416–422. Zhao Jianping. 1965. Study of ice nuclei concentration of North China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 35 (4): 416–422.
- Zhou M, Okada K, Qian F, et al. 1996. Characteristics of dust-storm particles and their long-range transport from China to Japan—case studies in April 1993 [J]. Atmos. Res., 40 (1): 19–31.