

气溶胶对云和降水的微物理效应

赵传峰¹, 李杰峰¹, 杨以坤¹

¹ 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京, 中国 100871

摘要: 气溶胶主要通过调节辐射能量收支, 并通过气溶胶-云相互作用改变云滴性质, 显著影响云和降水的发生与发展, 本文主要就气溶胶对云的微物理效应开展了综述研究。作为云凝结核或冰核, 气溶胶可以有效地改变云的辐射与微物理特性。在辐射收支方面, 气溶胶的增多会使得云滴粒径减小, 云对短波辐射的反照率增大, 形成云反照率效应; 同时, 它也会使得薄云的长波辐射系数增强, 将更多的地面长波辐射阻挡在云层之下, 形成云长波辐射效应。但吸收性气溶胶可能会促进云滴蒸发, 从而减小云的反照率。在降水方面, 当水汽不充分或风切变较强时, 云滴数目的增多伴随云滴有效半径减小, 从而抑制了降水, 延长了云的生命时间; 但是当云发展较为深厚时, 更多更小的云滴可以被输送到 0 °C 层以上, 通过冻结释放潜热, 从而促进了对流降水的产生。因此, 气溶胶的云微物理效应可以抑制弱降水的形成, 促进强降水的发生, 进而导致极端天气事件发生频率的增加。然而, 有许多研究观测到了与以上理论不一致的现象。为了解释这些现象, 本文通过总结前人的观测与理论研究成果, 系统地提出了气溶胶-云相互作用背后的四种物理机理: 单滴的水汽凝结与蒸发效应, 群滴的水汽竞争效应、碰并效应和夹卷效应。这些机制的相互竞争导致了研究中观测到的不同结果。最后, 本文指出了气溶胶-云-降水相互作用研究中的挑战及未来研究方向, 主要包括提高数据观测能力, 构建多因素影响下的气溶胶-云相互作用系统框架, 优化参数化方案, 以及推动人工智能在相关研究中的应用。

关键词: 气溶胶; 云微物理效应; 云降水; 凝结增长; 碰并增长

文章编号: 2025015A **中图分类号:** P401 **文献标志码:** A

DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2503.25015

收稿日期 2025-3-11; **网络预出版日期**

作者简介 赵传峰, 1977 年 2 月生, 男, 博士, 教授, 主要从事云降水物理和气溶胶研究。E-mail: cfzhao@pku.edu.cn

通讯作者 赵传峰, E-mail: cfzhao@pku.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金委重点项目 (42230601), 云南省科技厅西南联研重大科技专项计划项目 (202302AP370003)

Funded by National Natural Science Foundation of China (42230601), Yunnan Southwest United Graduate School Science and Technology Special Project (202302AP370003)

A Short Review about Microphysical Effects of Aerosols on Clouds and Precipitation

Chuanfeng Zhao¹, Jiefeng Li¹, Yikun Yang¹

1 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract:

Aerosols mainly influence cloud formation and precipitation by regulating the radiative energy balance and altering cloud droplet properties through aerosol-cloud interactions. This paper provides a comprehensive review of the microphysical effects of aerosols. As cloud condensation nuclei or ice nuclei, aerosols can significantly alter the radiative and microphysical characteristics of clouds. An increase in aerosol concentration can lead to smaller cloud droplet sizes, increasing the cloud albedo to shortwave radiation, referred to cloud albedo effect. Simultaneously, aerosols can enhance the longwave radiation emitted by thinner clouds, blocking more longwave radiation in atmosphere, which is known as the cloud thermal emissivity effect. However, absorbing aerosols may promote cloud droplet evaporation, thus reducing the cloud albedo. Furthermore, aerosols have significant impact on precipitation. When water vapor is insufficient or wind shear is strong, an increase in cloud droplet and a reduction in droplet effective radius can suppress precipitation and extend the cloud's lifetime. However, when clouds develop more deeply, more and smaller droplets can be transported above the 0°C level, where freezing releases latent heat, promoting convective rainfall. Therefore, the microphysical effects of aerosols can suppress weak precipitation and enhance strong precipitation, leading to an increase in extreme weather events. However, many studies have observed phenomena that are inconsistent with these theories. To explain these discrepancies, this paper systematically presents four physical mechanisms behind aerosol-cloud interactions: condensation and evaporation effects, water vapor competition effects, collision and coalescence effects, and entrainment effects. The competition among these mechanisms leads to the varied results observed in studies. Finally, the paper discusses the challenges and future research directions, with an emphasis on enhancing observational data capabilities, developing a comprehensive framework for aerosol-cloud interactions under varying conditions, optimizing parameterization schemes, and advancing the application of artificial intelligence.

Key words: Aerosols; Cloud microphysical effect; Cloud and precipitation; Condensational growth; Collision-coalescence

1 引言

云是地气系统的重要组成部分,全球平均覆盖率约为 70% (Rossow and Schiffer, 1999; King et al., 2013; Stubenrauch et al., 2013; Chuanfeng Zhao et al., 2019a), 在全球能量平衡和水循环中发挥着至关重要的作用 (Liou and Ou, 1989; Leaitch et al., 1992; Hartmann and Larson, 2002; Stephens, 2005; Garrett and Zhao, 2006; Andrews et al., 2012; Shiogama and Ogura, 2014; Chen et al., 2024)。云的存在显著调节了短波和长波辐射, 是影响地气系统辐射平衡的重要因素 (IPCC, 2023)。对于短波辐射, 云具有“阳伞效应”, 即通过反射太阳辐射从而增加行星反照率。地气系统接收到的太阳辐射中, 约有 30% 被反射回太空, 而其中云的贡献约占 70%。在长波辐射方面, 云可以吸收地气系统所发射的长波辐射, 并以自身的温度重新向外发射长波辐射。在这一过程中, 云阻挡了超过 80% 的地表长波辐射直接向外太空释放, 从而将这些辐射滞留在大气层内, 增强了温室效应。特别是在高纬度地区, 云的长波增温作用被认为是北极地表快速升温的重要因素之一 (Garrett and Zhao, 2006)。尽管云对辐射的影响因地区、季节和云类型而异, 但总体而言, 云的存在有效地调节了地球表面的温度, 减小了日间气温波动, 从而在一定程度上维持了适宜的气候条件 (Dai et al., 1997; Sun et al., 2000)。

云和降水是地球系统大气水循环中的一个重要环节, 在维持地球淡水资源平衡中发挥着重要作用。在水循环过程中, 地球的淡水资源在重力作用下从陆地流向海洋, 导致陆地水资源逐渐减少。然而, 海洋大量的水分通过蒸发进入大气, 并在大气环流的作用下输送到陆地, 在适当的气象条件下凝结成云。当云中的水汽转化为降水时, 它们重新降落到地表, 补充陆地的淡水资源。在全球水循环中, 海洋和陆地的蒸发与降水量存在显著差异。根据研究, 全球每年海洋蒸发量约为 $3.61 \times 10^{14} \text{ m}^3$, 陆地蒸发量约为 $0.62 \times 10^{14} \text{ m}^3$; 而海洋降水量约为 $3.24 \times 10^{14} \text{ m}^3$, 陆地降水量约为 $0.99 \times 10^{14} \text{ m}^3$ (Peixoto and Oort, 1992)。这些数据表明, 通过云和降水过程, 每年约有 $3.7 \times 10^{13} \text{ m}^3$ 的淡水从海洋输送到陆地, 成为陆地江河径流和水资源的重要补给来源。因此, 云和降水不仅是地球淡水资源循环的核心组成部分, 也是全球水资源分布和区域水文循环的重要调节因素。

从微物理过程的角度来看, 云是气溶胶和水汽在一定的热动力条件下, 通过物理过程生成的水成物集合体。气溶胶作为大气中悬浮的固态或液态粒子, 在云的生成和发展中起着至关重要的作用。在云的形成中, 气溶胶为水蒸气提供了云凝结核或冰核, 其自身的性质, 如浓度、化学组成和粒径大小等, 都会影响云滴或冰晶的特征, 从而改变云的微物理特性, 这一过程被称为气溶胶对云的微物理效应。这些变化不仅能够影响云的形成与发展, 还可能对随后的降水过程产生深远影响。研究表明, 气溶胶通过影响云和降水的特征, 可能加剧或减缓极端气候事件, 如干旱、洪涝和闪电等, 进而对自然灾害和社会经济产生显著影响 (Liu et al., 2015; Alcide D. Zhao et al., 2019; Wang et al., 2023)。因此, 气溶胶的区域分布差异通常导致其在不同区域对云和降水表现出不同的作用 (Guo et al., 2017; Guo et al., 2019; Li et al.,

2019; Sun and Zhao, 2021)。甚至在同一区域, 由于气溶胶来源和时空格局的不同, 其对云和降水的影响也会随之发生变化 (Guo et al., 2022; Feng et al., 2023)。许多研究探讨了气溶胶在中国不同地区对不同类型云和降水的影响, 发现其作用差异较大, 既有促进作用, 也有抑制作用, 甚至存在不明显的影响 (Tang et al., 2014; Guo et al., 2017; Li et al., 2019)。中国地域广阔, 气溶胶特征受自然排放、人为活动及区域传输等多重因素的影响, 导致其在不同地区对云降水的作用存在显著差异, 这增加了研究的复杂性 (段婧和毛节泰, 2008; Li et al., 2019)。Sun and Zhao (2021) 指出中国东部地区气溶胶对降水触发和峰值时间的影响受气溶胶吸收性的显著影响: 华北地区的吸收型气溶胶使降水触发和峰值时间提前, 而华南地区的散射型气溶胶则推迟了触发和峰值时间。许多研究发现在华北地区气溶胶与云滴有效半径呈负相关 (Zhang et al., 2011; Zhao et al., 2018a; Yang et al., 2019), 然而 Chuanfeng Zhao et al. (2019b) 和 Yang et al. (2021) 的研究却发现, 某些情况下云滴有效半径随着气溶胶的增加而增大, 并将这一现象归因于水汽补给和云内碰并作用。与此同时, 有研究指出, 在中国东部沿海地区, 海洋气溶胶的活化是影响气溶胶对云降水作用的重要因素之一 (Che et al., 2021; Guo et al., 2022), 而在中西部地区或青藏高原, 沙尘气溶胶的影响则更为显著 (Zhao et al., 2022; Feng et al., 2023; Chen et al., 2024)。这些研究强调了大气环流和气溶胶类型在气溶胶-云降水研究中的重要性。

除了气溶胶的自身特性外, 气溶胶对云和降水的作用还受到其他物理过程和气象因素的影响, 这使得气溶胶对云的微物理效应呈现出高度复杂性。研究显示, 在不同的气象场背景下, 气溶胶对云和降水的作用也表现出显著的差异 (Khain et al., 2008; Fan et al., 2009), 这使得气溶胶对云的形成与发展以及降水过程的影响难以得到独立的解析和精确的量化 (段婧和毛节泰, 2008)。因此, 气溶胶在云宏观特征 (如云量、云厚、云水含量等)、微观特征 (如云粒子浓度、粒径等) 以及降水过程中的作用仍然缺乏深入的研究, 且其影响机制尚未得到系统性总结。尤其是在云的动力学、热力学、微物理和化学过程等方面的研究仍然不完善, 这进一步增加了气溶胶对云和气候系统影响的高度不确定性。虽然已有研究揭示了云宏观和微观参数变化与降水过程之间的紧密关系 (周秀骥和顾震潮, 1963; 周广强等, 2005; 杨薇等, 2017; 傅云飞, 2018), 但气溶胶对这些参数以及降水强度的具体影响仍存在显著的不确定性 (Rosenfeld, 1999; Min et al., 2009), 这使得气溶胶-云相互作用的模拟在气候预测和天气预报中面临较大挑战。因此, 本综述旨在梳理总结前人的研究成果, 重点讨论以下几个关键问题: (1) 气溶胶如何通过微物理效应改变云的发生和发展; (2) 不同因素影响下云滴粒径随气溶胶的不同变化及其背后的机理; (3) 气溶胶在不同大气条件下对降水的影响, 特别是对较弱降水和较强降水的作用; (4) 气溶胶-云-降水相互作用研究中的挑战及未来研究方向。

2 气溶胶对云的微物理效应的主要机理

政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 在第四

次（IPCC, 2007）、第五次（IPCC, 2013）和第六次（IPCC, 2023）评估报告中均对气溶胶-云相互作用及其机理进行了阐述。报告指出，气溶胶-云相互作用是当前气候变化预测模型中的最大不确定性来源之一，也是目前人类对气候和天气系统理解中的一个重要未知领域。因此，深入理解气溶胶-云相互作用的机理，对于提升气候模型的精确性和应对未来气候变化挑战至关重要。

气溶胶对云的微物理效应的研究已经经历了数十年的发展，其早期的理论主要集中在气溶胶如何通过影响云的短波辐射过程，进而影响云的发展和降水形成。广义而言，气溶胶对云的微物理效应是指气溶胶作为云凝结核或冰核参与云的形成，并通过微物理效应改变云的特征。IPCC 第四次评估报告（IPCC, 2007）将气溶胶对云和降水的影响主要归纳为了三个方面。首先，气溶胶的增加会使得云滴数量增多，云滴有效半径减小，从而使得云的反照率增大，这一现象被称为云反照率效应（Cloud Albedo Effect），也被称为气溶胶的第一间接效应（First Indirect Effect）或 Twomey 效应（Twomey, 1974）。其次，气溶胶的增多通过减小云滴有效半径，抑制了本应形成的降水，或者使得原本能够产生较强降水的云仅能形成较弱的降水，从而延长了云的生命时间，促进云的持续存在和发展。这一过程被称为云生命时间效应（Cloud Lifetime Effect），也被称为气溶胶的第二间接效应（Second Indirect Effect）或 Albrecht 效应（Albrecht, 1989）。最后，如果有吸收性气溶胶进入云内，其可以通过吸收太阳短波辐射加热云内大气，从而导致云滴蒸发甚至消失，这一现象被称为燃烧效应（Cloud-burning Effect），也被称为半直接效应（Semi-direct Effect）或 Ackerman 效应（Ackerman et al., 2000）。而 IPCC 第五次评估报告从对辐射影响的角度入手，定义了气溶胶-云相互作用。报告中将气溶胶的第一和第二间接效应统称为气溶胶-云相互作用（Aerosol Cloud Interaction, ACI）；同时，气溶胶的半直接效应和气溶胶本身的辐射效应则被一起称为气溶胶-辐射相互作用（Aerosol Radiation Interaction, ARI）。一般而言，在研究中通常从广义上考虑气溶胶的云微物理效应，因为这些效应都对云的形成、发展及降水过程具有重要影响。值得注意的是，云反照率效应和半直接效应均与短波辐射的传输过程有关，而云生命时间效应则主要影响降水过程，但同时也能通过改变云量或云频率，进而影响短波辐射（Lohmann and Feichter, 1997）。

2000 年后，气溶胶对云和降水影响的机制研究取得了显著进展，更多复杂的机制被发现并提出。针对长波辐射，研究发现气溶胶的增加可以通过减小云滴的有效半径，导致薄云的长波辐射系数增加，从而使得更多的长波辐射被大气层吸收并滞留在其中，这一过程促进了地面温度的上升，称为云长波辐射效应（Cloud Thermal Emissivity Effect），该效应在非常清洁的环境中尤其明显，例如在北极地区云长波辐射效应是近地表变暖的重要因素之一（Garrett and Zhao, 2006; Zhao and Garrett, 2015）。云反照率效应、云燃烧效应和云长波辐射效应共同构成了气溶胶-云相互作用中的辐射效应体系，分别从短波和长波辐射两个方面影响云的辐射特性。其次，研究发现云的生命时间效应通常在弱降水中起作用，即气溶胶的增

加可以抑制弱降水。而对于较强的降水事件，进一步研究表明，气溶胶的增多使得云滴有效半径减小，这些小云滴可以被输送到更高的高度，经过冻结作用释放更多的潜热，从而增强对流活动，导致更强的降水。这一现象被称为对流激发效应（Invigoration Effect）（Rosenfeld et al., 2008）。需要注意的是，以上讨论的对流激发效应主要指的是液滴冻结成冰晶时的潜热释放作用，因此也被称为冷相激发效应（Cold-phase Invigoration Effect）。一些观测和模拟研究也观察到气溶胶对降水的促进效应，并将其归因于气溶胶增加导致的云滴凝结潜热释放的增强（Sheffield et al., 2015; Fan et al., 2018），提出了暖相激发效应（Warm-phase Invigoration Effect）。然而有研究指出，这一效应需要云内具有极大的过饱和度（远大于 1%），目前这一效应还存在争议（Öktem et al., 2023; Romps et al., 2023）。在本文中，对流激发效应仅针对包含冰晶的深对流云，这一效应揭示了气溶胶在降水过程中可能产生的双重作用，即气溶胶的云微物理效应可以抑制弱降水的形成，促进强降水的发生（Li et al., 2011）。这些气溶胶对云降水的微物理效应理论在许多观测和模拟研究中得到了验证（见表 1），并成为研究气溶胶对云降水影响的理论基础。

表 1 部分气溶胶对云降水微物理效应理论的观测和模拟证据研究。

Table 1 Summary of observational and simulation evidence on the theories of aerosol microphysical effects on cloud and precipitation.

气溶胶对云降水的 微物理效应理论	云类型	研究方法	部分参考文献
第一间接效应	船迹云	卫星观测	Coakley et al., 1987
第一间接效应	水云	地基观测与模式模拟	Zhao et al., 2012
第一间接效应	水云	飞机观测	Zhao et al., 2018a
第二间接效应	船迹云	飞机观测	Ferek et al., 1998
第二间接效应	混合云	卫星观测	Rosenfeld, 2000
第二间接效应	混合云	卫星观测	Lindsey and Fromm, 2008
半直接效应	层积云	模式模拟	Johnson et al., 2004
半直接效应	水云	卫星观测	Wilcox, 2012
半直接效应	总云	卫星观测	Huang et al., 2006
云长波辐射效应	中低层薄云	地基观测	Garrett and Zhao, 2006
云长波辐射效应	水云	地基观测	Zhao and Garrett, 2015
云长波辐射效应	总云	卫星观测	Arouf et al., 2022
对流激发效应	对流云	卫星观测	Koren et al., 2008
对流激发效应	对流云	地基与卫星观测	Bell et al., 2008
对流激发效应	对流云	地基观测与模式模拟	Li et al., 2011

图 1 总结了气溶胶-云相互作用的主要机理。如前所述，气溶胶-云相互作用的辐射效应包括云反照率效应、燃烧效应和长波辐射效应；而降水效应则涉及云生命时间效应和对流激发效应。这些效应共同作用，揭示了气溶胶对云和降水过程的深远影响。值得注意的是，所有这些机制的核心基础是气溶胶的增多导致云滴数目的增加和云滴有效半径的减小，即 Twomey 效应。接下来，本文将围绕这一基础机制，总结相关研究成果，探讨在多种因素的影响下，气溶胶如何通过云微物理效应，影响云的特征和降水的形成和发展。

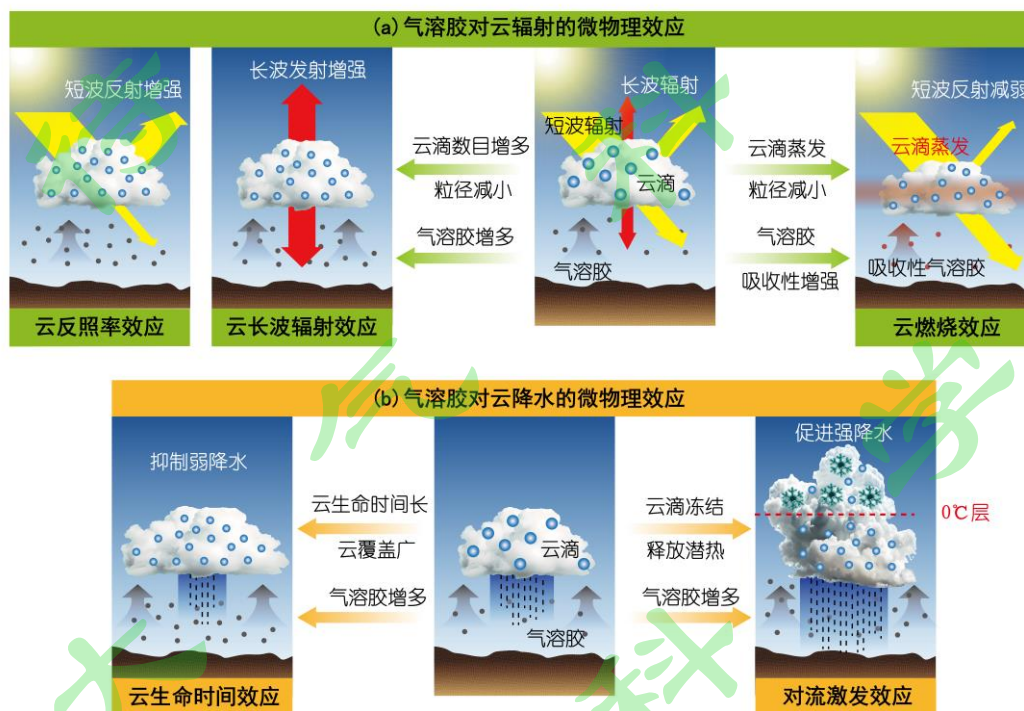


图 1 气溶胶对云的微物理效应的主要机理。(a) 气溶胶对云辐射的微物理效应，包括云反照率效应、云长波辐射效应及云燃烧效应。(b) 气溶胶对云降水的微物理效应的降水效应，包括云生命时间效应和对流激发效应。

Fig. 1 Main mechanisms of aerosol microphysical effects on clouds. (a) Radiative effects of aerosol microphysical effects, including the cloud albedo effect, cloud thermal emissivity effect, and cloud-burning effect. (b) Precipitation effects of aerosol microphysical effects, including the cloud lifetime effect and invigoration effect.

3 不同因素影响下的气溶胶对云滴的影响及其机制

Twomey 效应指的是在云水含量保持恒定的情况下，气溶胶增多导致云凝结核（Cloud Condensation Nuclei, CCN）数量增加，从而使云滴数浓度增加，云滴有效半径减小的现象。虽然 Twomey 效应已在大量研究中得到了证实（Feingold et al., 2001; Kim et al., 2003; Garrett et al., 2004; Zhao et al., 2012; Qiu et al., 2017; Zhao et al., 2018a; Yang et al., 2019; Chuanfeng

Zhao et al., 2019b), 且符合云微物理学理论, 然而在实际观测中, 由于难以完全保持云水含量恒定, 某些研究结果与 Twomey 效应理论的预期并不完全一致。一些研究发现, 气溶胶或 CCN 的增多并没有使云滴有效半径减小, 反而有增大的趋势 (Bulgin et al., 2008; Panicker et al., 2010; Tang et al., 2014; Qiu et al., 2017), 这种现象被称为反 Twomey 效应 (Anti-Twomey Effect)。此外, 还有部分研究发现, 云滴有效半径随气溶胶浓度的增加出现先减小后增大的趋势 (Tang et al., 2014; Wang et al., 2015)。

针对这些不同的观测现象, 前人研究从多个角度探讨了可能的影响因素, 包括可降水量 (Precipitable Water Vapor, PWV) (Yuan et al., 2008)、垂直风切变 (Kim et al., 2003)、对流层低层大气稳定度 (Fu Wang et al., 2014) 等气象变量, 气溶胶浓度和类型等气溶胶变量 (Shao and Liu, 2005; Zhao et al., 2012), 以及云厚和云类型等云特征变量 (Shao and Liu, 2005; Zhao et al., 2012)。以上一系列研究发现, 一般来说, 对于单独的对流云, 在云水含量较低、垂直风切变较强、大气相对稳定的条件下, 气溶胶增多会导致云滴有效半径减小; 而在云水含量较高、垂直风切变较弱、大气不稳定性较高的情况下, 云滴有效半径通常会随着气溶胶浓度的增加而增大, 或者变化不显著。

然而, 现有的研究多侧重于从单一因素角度解释不同的观测现象, 虽然这些因素能够有效地解释特定区域的观测结果, 但并不适用于所有情况。为了系统地分析气溶胶对云的微物理效应背后的物理机理, 基于前人的观测与理论研究成果, 本文提出了气溶胶对云的微物理效应中不同观测现象背后的四种物理机制 (如图 2 所示)。具体而言, 水汽的凝结和蒸发是影响云滴大小的最直接因素。气溶胶粒子充当 CCN 活化成为云滴后, 会经历单个云滴的凝结增长和蒸发过程 (特别是位于云边缘等特殊情景下的云滴), 前者会使得云滴长大, 而后者会使得云滴减小 (图 2, 过程 a)。需要注意的是, 云滴有效半径是云内云滴谱分布的群体特征, 因此还必须考虑云滴群体特性的变化。相应的物理过程包括了云滴碰并增长、云滴间的云水竞争 (凝结增长消耗水汽的竞争作用), 以及夹卷过程等。通常情况下, 云滴碰并增长会促进较大云滴的生成, 从而使云滴有效半径增大 (图 2, 过程 b)。而云水竞争效应, 特别是在云滴活化数量较多时, 会使得云滴谱向小云滴偏移, 从而导致云滴有效半径减小 (图 2, 过程 c)。相反, 如果活化的云滴数量较少, 则云滴间的水汽竞争较弱, 此时, 云滴有效半径通常因水汽凝结的增加而增大。此外, 夹卷过程也是影响云滴大小的重要因素。干空气和气溶胶粒子通常会因夹卷过程而卷入云内。干空气的侵入会导致云滴蒸发, 从而使大云滴减小; 而气溶胶的卷入则会促进水汽的竞争和更多小云滴的生成, 这两者都会使得云滴有效半径减小 (图 2, 过程 d)。因此, 气溶胶可以通过活化充当 CCN, 在单滴和群滴微物理过程的作用下, 改变云滴谱分布, 进而影响云滴有效半径。在不同气象条件、气溶胶特征以及云的物理属性下, 这些物理机制的相对贡献不同, 从而导致不同观测研究中发现的多样化现象和规律。

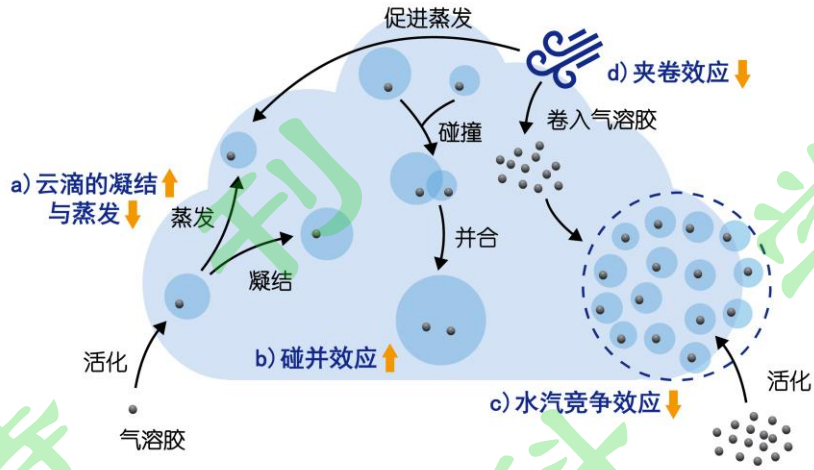


图 2 气溶胶对云的微物理效应中的关键物理机制：(a) 云滴的凝结与蒸发；(b) 碰并效应；(c) 水汽竞争效应；(d) 夹卷效应。橙色箭头表示各机制对云滴粒径的影响，向上箭头表示促进云滴粒径增大，向下箭头表示导致云滴粒径减小。黑色箭头表示云内发生的物理过程。

Fig. 2 Key physical mechanisms of aerosol's microphysical effects on clouds: (a) Cloud droplet condensation and evaporation; (b) Collision-coalescence effect; (c) Water vapor competition effect; (d) Entrainment effect. Orange arrows indicate the impact of each mechanism on cloud droplet size, with upward arrows indicating an increase in droplet size and downward arrows indicating a decrease. Black arrows represent physical processes occurring within the cloud.

值得注意的是，以上的过程机理主要发生在气溶胶与液态云滴之间。然而有许多云和降水过程涉及冰晶的形成与发展。气溶胶对冰晶浓度、形态、大小等特征的影响以及后续冰晶与冰晶、冰晶与云滴间的相互作用（贝吉龙效应、二次冰晶生成效应、淞附效应等）对云和降水的特征有着显著的影响（Leroy et al., 2006; Lee et al., 2014; Bin Zhao et al., 2018; Du et al., 2024）。Lee et al.（2014）通过模式模拟发现，气溶胶的增加会使云内云滴和冰晶增多，淞附效应增强，从而促进云的发展。Zhao et al.（2022）和 Feng et al.（2023）发现沙尘气溶胶的增加可以通过提供冰核从而促进云的发展和极端降水事件的发生。此外，气溶胶对冰晶的影响也是影响气候的重要因素之一，其可以通过改变云的辐射效应从而改变能量收支（Prenni et al., 2007; DeMott et al., 2010）。利用多源数据，Chen et al.（2024）指出近年来青藏高原冰核浓度的下降加剧了云冷却效应。然而，冰晶过程的机制较为复杂，因此在本研究中，我们主要聚焦于气溶胶对液态云滴的影响过程。为了定量分析气溶胶对云滴粒子的影响，常采用以下相对变化来定义气溶胶第一间接作用（Garrett et al., 2004）：

$$FIE = - \frac{d \ln r_e}{d \ln \sigma_a} \quad (1)$$

式中 FIE（First Indirect Effect, FIE）表示气溶胶的第一间接作用，即云滴有效半径对气溶

胶的相对敏感性, r_e 为云滴有效半径, σ_a 为气溶胶量的表征指标, 可以是气溶胶后向散射系数、CCN 数浓度、PM_{2.5} 质量浓度或者气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD)。FIE>0 表示云滴有效半径随气溶胶的增多而减小, 即 Twomey 效应; 而 FIE<0 则表示云滴有效半径随气溶胶的增多而增多。需要注意的是, 不同的气溶胶量的表征指标会导致不同的结果 (Zhao et al., 2012), 但由于本文聚焦于气溶胶对云滴粒子的微物理影响机理, 表征指标的选择对 FIE 的影响将在本文中不做深入讨论。

基于上述分析探讨的几种物理机理, 可以对以往研究中观察到的不同现象提供合理的物理解释。在某些情况下, 图 2 所示的物理机制中的几种相互协同, 共同发挥主导作用, 驱动气溶胶对云滴特征的影响。Garrett et al. (2004) 发现在北极地区, 层云的云滴数浓度和有效半径对气溶胶污染表现出高度的敏感性, FIE 数值介于 0.13-0.19 之间, 表明云滴有效半径随气溶胶浓度的增加显著减小, 而这一现象就是多种机制共同促进的结果。北极地区大气湍流和对流均较弱, 云的生命时间较长 (Garrett and Zhao, 2006; Morrison et al., 2012; Zhao and Garrett, 2015), 因此云滴的碰并效应可忽略不计, 云滴难以通过碰并增长。由于对流较弱, 云水主要通过平流生成, 导致云水含量较低, 增强了云水竞争效应。而云中较低的过饱和度进一步抑制了云滴的凝结增长速率。此外, 北极地区常受到远距离传输气溶胶的影响 (Garrett et al., 2010; Bourgeois and Bey, 2011), 额外气溶胶的出现会通过活化效应促进更多小云滴的生成, 从而使云滴谱向小云滴偏移。而北极地区云顶附近通常存在较弱的逆温层且湍流夹卷效应较弱 (Curry, 1986; Garrett et al., 2009), 夹卷效应对气溶胶-云相互作用影响较小。综上所述, 气溶胶的微小变化可以通过云水竞争和活化效应显著影响北极地区的云滴特征, 而夹卷效应和云滴的碰并效应对有效半径变化的贡献较小。这些机制共同作用, 使得北极地区云滴有效半径对气溶胶具有非常显著的负响应。

尽管气溶胶对云滴的影响受多种机制的共同作用, 某些机制在不同情境下可能占据主导地位, 显著影响云滴的粒径大小。一些飞机观测研究表明, 不同气溶胶浓度下, 气溶胶对云滴粒径变化的主导机制会发生变化。Zhao et al. (2018a) 对河北地区 7 个架次的 27 朵层状云进行了个例统计研究, 发现相比清洁情境, 污染情境下云滴谱更加集中于小粒径范围, 导致云滴有效半径减小。这表明在气溶胶浓度较高的情况下, 云水竞争效应在气溶胶影响云滴特征中的主导作用。Yang et al. (2019) 基于飞机观测浅对流云的数据, 深入研究了气溶胶对云滴粒径影响的机制, 发现在气溶胶浓度非常低 ($<400 \text{ cm}^{-3}$) 的情况下, 云滴有效半径随气溶胶 (粒径 $0.1\text{--}3 \mu\text{m}$) 增多有微弱的增加趋势 (未通过显著性检验), 这表明在水汽充足且气溶胶浓度较低时, 云水竞争效应不再是影响气溶胶的云微物理效应的主导因素, 而和对流云上升气流有关的云滴碰并和云滴凝结增长效应更为重要, 从而导致云滴有效半径略有增大。但随着气溶胶浓度的进一步增加 ($400\text{--}1000 \text{ cm}^{-3}$), 云滴有效半径随气溶胶变化相对缓慢, 表明几种物理机制的效应相互抵消, 趋于准平衡。而当气溶胶浓度较高 ($>1000 \text{ cm}^{-3}$) 时, 云滴有效半径明显减小, 表明云水竞争效应与气溶胶活化效应开始主导云滴特征的变化。

气溶胶对云的微物理效应常受到环境气象因素的显著影响,而这些影响也是通过上述的基本物理过程实现的。水汽含量是影响气溶胶-云相互作用的重要因素之一,当有足够多的水汽可以用于 CCN 的活化时,水汽的竞争效应较弱,云滴有效半径会因水汽凝结而变大。Qiu et al. (2017) 利用 8 年地基观测数据进行了季节性统计研究,分析了四个季节清洁和污染两种情景下的云滴有效半径廓线分布。研究发现,在低 PWV 情景下,相比清洁情景,四个季节的污染情景下的云滴有效半径均较小,表明云水含量的限制使得云水竞争效应在气溶胶活化过程中占主导地位。然而在高 PWV 情景下,除夏季外,在其他三个季节,云滴有效半径都在污染情景中较大;而夏季则仍在清洁情景下云滴有效半径较大。这表明,随着云水供应逐渐变得充分,云水竞争效应减弱,而云滴凝结增长和碰并增长效应增强,进而成为主导机制。但在夏季,较高的气溶胶浓度使得云水竞争效应依然占主导地位,这意味着云滴有效半径随气溶胶变化所对应的 PWV 转折点随气溶胶含量的增多而增大。Yang et al. (2019) 利用飞机观测数据,发现云中下沉气流增强时,云滴有效半径显著减小,这表明云内气流在气溶胶对云的微物理效应中的重要影响。随着云中气流速度的增加,云的夹卷效应增强,蒸发效应增强,导致云滴的快速减小。此外,一些研究也指出,在单体对流云中,垂直风切变对促进夹卷效应引起的蒸发有重要促进作用,这会使得云滴有效半径减小,从而影响气溶胶对云的微物理效应 (Fan et al., 2009; Sun et al., 2024)。

根据上述分析,可以看出,前人观测研究中所发现的不同气溶胶-云相互作用现象,均可通过图 2 中总结的几种物理过程进行解释和理解。

4 气溶胶对极端降水天气的影响

气溶胶通过改变云的微物理特征,可以对导致干旱和洪涝的弱降水和强降水两种极端降水天气产生重要影响。国内外许多研究都发现了气溶胶可以促进强降水而抑制弱降水,即气溶胶的增多容易导致干旱事件或地区变得更加干旱,洪涝事件或者地区变得更加洪涝。Niu and Li (2012) 将其归因于 Twomey 效应对流激发效应的作用,这两种效应在不同类型云中发挥的作用不同。一般来说,强降水产生于发展较为深厚的云,而较浅薄的云只能产生较弱降水。一些研究发现,较为深厚的混合云在气溶胶增加时可以快速发展,从而促进强降水的发生;而对于较为浅薄的云或者暖云,其云顶高度即云厚度随气溶胶没有明显的变化,而云滴有效半径却随着气溶胶的增加而减小,因此抑制了降水 (Qian et al., 2009)。这是因为在较为深厚的云中,当液滴被抬升到 0°C 层以上时,会冻结从而释放大量的潜热,从而促进云和降水的发展。此外,气溶胶的类型也能够通过影响 Twomey 效应从而影响降水。例如,当吸湿性较强的海盐巨型云凝结核 (GCCN) 出现时,其可以生成较大的云滴,抵消 Twomey 效应的影响,从而促进降水的发生 (Guo et al., 2022)。

Khain et al. (2008) 总结概述了气溶胶的降水效应,指出除了云的类型,环境气象因素在气溶胶对降水的影响中具有重要作用,特别是水汽和风切变因素。通过站点观测数据,在

中国东部沿海和美国南部地区都发现，气溶胶的增多会减少液态水路径（Liquid Water Path, LWP） 较低的云发生降水的频率，会增加高 LWP 的云发生降水的频率；而在降水强度上，气溶胶的增多会使得弱降水变得更弱，强降水变得更强（Li et al., 2011; 彭杰, 2015）。利用云解析模式，Fan et al.（2009）发现较强的风切变可以促进气溶胶对降水的抑制作用，而较弱的风切变则会促进气溶胶的对流激发效应。这是因为风切变越强，由夹卷效应引起的蒸发与气溶胶粒子的卷入越强，可以抵消因凝结释放的热量，从而抑制对流的发展。值得注意的是，以上风切变的影响是针对单个对流云的情况而言的。而在中尺度对流系统中，较强的风切变有助于增强下沉气流，加强冷池强度，进而可能在附近触发新的对流云发展。然而，气溶胶与环境因素对降水的相对作用大小存在较大不确定性，在一些研究中相对湿度是影响气溶胶-降水相互作用的关键因素（Yuan et al., 2008; Lee, 2011），而在一些研究中气溶胶的作用更为突出（Qian et al., 2009）。无论如何，气象条件的影响依然通过图 2 中的相关机制调节气溶胶对云降水的作用，这些机理在表 2 中进行了总结。

表 2 部分气象条件对气溶胶云降水微物理效应的影响机理总结。

Table 2 Summary of the mechanisms of meteorological conditions on aerosol microphysical effects on cloud and precipitation.

气象要素变化	对气溶胶云降水微物理效应的影响机理	对降水的影响	部分参考文献
风切变增强 (对流单体云)	增强夹卷效应，加剧云滴蒸发	抑制	Fan et al., 2009; Guo et al., 2016; Xiao et al., 2022
风切变增强 (云系统)	加剧云滴蒸发，增强云下冷池， 促进二次云生成	促进	Tao et al., 2007; Lee et al., 2008
PWV 增大，RH 增大	减小水汽竞争效应，促进云滴凝结	促进	Khain et al., 2008; Yuan et al., 2008; Qiu et al., 2017; Xiao et al., 2022
LTS 减小，CAPE 增大	增强对流云中气溶胶夹卷，激发效应更强	促进	Storer et al., 2010; Guo et al., 2016; Xiao et al., 2022
下沉气流增强	增强夹卷效应，加剧云滴蒸发	抑制	Yang et al., 2019

针对上述提到的气溶胶对极端降水的不同影响，图 3 给出了一个总结性概念示意图。气溶胶增多对于弱降水在云水供应不足或风切变较强的情况下会使得降水变弱、变少；对于强降水在云水供应充分或风切变较弱的情况下会使得降水增强、增多。中国西北地区主要属于干旱和半干旱气候区，降水稀少；而东部地区则受到季风影响，降水频繁。气溶胶在这两个

地区对云和降水的作用机制因气溶胶类型、气象条件和水汽供应差异有所不同。中国西北地区的主要气溶胶类型为沙尘气溶胶和部分人为污染气溶胶,这些沙尘气溶胶不仅可以作为冰核促进降水发展 (Zhao et al., 2022; Feng et al., 2023), 还可能在暖雨过程中充当 GCCN, 增强云滴的碰并作用, 进而影响降水强度 (Yin et al., 2002; Zhu et al., 2023), 但沙尘的半直接效应也可能加剧云滴的蒸发, 使西部地区更加干旱 (Huang et al., 2014)。相比之下, 东部季风区的气溶胶主要来源于人类活动, 有许多观测和模拟研究都证明了其抑制弱降水、促进强降水的作用 (Guo et al., 2016; Wang et al., 2011)。在夏季风影响下, 海盐粒子作为 GCCN 也会促进沿海地区降水的发生 (Che et al., 2021; Guo et al., 2022)。水汽条件差异在两个地区表现明显。在西部干旱半干旱地区, 由于水汽供应有限, 气溶胶的水汽竞争效应较强, 导致云滴有效半径减小, 进而影响降水效率 (Yang et al., 2013; Huang et al., 2014)。相比之下, 由于夏季风提供了良好的水汽和动力条件, CCN 间水汽竞争效应较弱, 甚至可能出现反 Twomey 效应, 气溶胶对降水的抑制作用不太明显, 甚至会使降水频率增加 (Yuan et al., 2008; Li et al., 2011; 彭杰, 2015; Qiu et al., 2017)。此外, 西部地区地形复杂, 地形降水占比大, 气溶胶的增加可能会干扰这一降水过程, 导致降水减少 (Rosenfeld et al., 2007); 而东部季风区夏秋季节常受到台风影响, 研究显示气溶胶可以延迟台风发展、削弱台风强度以及扩大台风降水面积 (Yuan Wang et al., 2014; Zhao et al., 2018b)。总体而言, 气溶胶对不同地区云降水的影响受到气溶胶类型、气象条件及区域气候特征的综合作用。目前西部地区的相关研究较少, 且复杂地形下的影响机制尚未充分探索。未来应加强西部干旱半干旱区的观测与模拟研究, 特别需要关注地形复杂区域不同气象条件下气溶胶对云降水的多尺度作用机制。

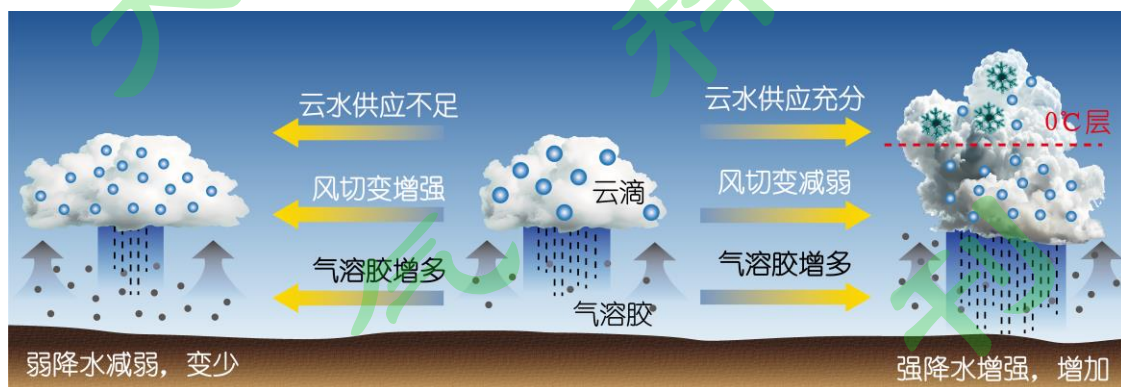


图 3 不同气象条件下气溶胶对极端降水的影响示意图。左侧描述了在云水供应不足和风切变增强时, 气溶胶对弱降水的抑制作用; 右侧描述了在云水供应充分和风切变减弱时, 气溶胶对强降水的促进作用。

Fig. 3 Schematic illustration of the impact of aerosols on extreme precipitation under different meteorological conditions. The left side illustrates the suppressive effect of aerosols on weak precipitation under conditions of insufficient cloud water supply and enhanced wind shear; the right side illustrates the enhancing effect of aerosols on strong precipitation under conditions of

sufficient cloud water supply and weakened wind shear.

基于以上分析,气溶胶可以通过对云的微物理效应影响降水,但实际上这些过程常与气溶胶辐射效应作用在一起,共同影响降水过程。利用站点和卫星观测数据,许多研究都发现了气溶胶对降水先促进后抑制的作用 (Koren et al., 2012; Guo et al., 2017; Guo et al., 2019; Liu et al., 2019; Sun et al., 2024)。这些研究认为,这是气溶胶的辐射效应与微物理效应竞争的结果。当气溶胶较少时,随着气溶胶的增加能够产生更多的降水粒子从而促进降水,但在气溶胶较多的情况下,气溶胶的辐射效应的影响开始增加,气溶胶的增加常会使地表降温,抑制对流,从而抑制降水。但这一过程也与气溶胶的吸收特性与所在的位置有关。Sun and Zhao (2021) 研究发现华北平原地区的吸收型气溶胶可以通过加热近地面促使局地对流性降水提前发生,而珠三角地区的散射型气溶胶通过冷却地面促使对流性降水发生事件滞后。此外,气溶胶还可以通过辐射效应与微物理效应的共同作用,改变降水的空间格局。例如,Zhao et al. (2018b) 基于卫星观测数据发现气溶胶可以改变台风雨带的降水空间分布,通过增强外雨带的降水强度、减弱内雨带的降水强度促使台风降水面积扩大,同时增加了整个台风的降水量。早期的模式模拟研究也发现了相近结论 (Yuan Wang et al., 2014), 并给出了气溶胶-云降水相互作用的理论解释: 气溶胶的增多会通过辐射冷却效应使得气温降低,气溶胶进入台风内部的数量减小,更多的气溶胶进入台风外围对流云带、更少的气溶胶进入台风内围(如台风壁)对流云带;无论进入台风内围还是外围云带的气溶胶都可以进一步通过微物理效应使得云滴数目增多,云滴有效半径减小,从而更多的云滴被对流输送到 0°C 层以上,从而通过对流促进作用使得对流与降水增强;而由于进入内围的气溶胶减少、进入外围的气溶胶增多,气溶胶的对流促进效应使得台风内围降水减弱、外围降水增强。因为本文主要关注于气溶胶的云微物理效应对降水的影响,关于气溶胶的辐射效应在此不再过多叙述。

前人研究表明,气溶胶可以通过充当云凝结核改变云的微物理特征,进而对降水产生重要影响。基于这些气溶胶-云降水相互作用理论,我们可以通过人工干预影响云的形成和发展,从而引导降水过程朝着预期方向发展。人工影响天气的技术涵盖了多种手段,包括增雨、消雨、防雹等,其方法既涉及对云微物理过程的调控,也涉及对大气动力过程的改变。由于本文的重点不是人工影响天气,我们在这里同样不做过多介绍。

5 结论和讨论

气溶胶对云降水天气的影响是当前模式模拟和预测中最大的不确定性因子之一,且其作用受到多种过程和因素的综合影响,对地球辐射能量平衡和大气水循环具有至关重要的调节作用。因此,深入研究气溶胶对云降水的影响具有重要的科学意义。

综合前人研究成果,气溶胶作为云凝结核对云的影响可以从辐射效应和降水效应两个层面进行探讨和理解。在辐射效应方面,气溶胶通过增加云滴数浓度使得云对短波的反照率增

加,从而导致地面冷却,这被称为云反照率效应。另一方面,气溶胶的增加还会导致云滴数浓度增大,从而使得薄云的长波辐射系数提高,进而导致地面增暖,这一现象被称为云长波辐射效应。此外,吸收性气溶胶通过吸收短波辐射和加热云滴,使得云滴蒸发变小甚至消失,形成了半直接效应。在降水效应方面,气溶胶的增多通常会导致云滴有效半径减小,从而抑制弱降水的形成,或者使原本能产生强降水的云转变为较弱降水云,这一现象被称为云的生命时间效应。对于强降水,气溶胶增多会导致更多小云滴的形成,这些小云滴在对流上升气流的作用下进入 0℃ 层以上,并通过冷凝作用释放潜热增强对流,从而促进更强的降水,即对强降水的对流促进效应。

云滴有效半径随气溶胶变化的机制是气溶胶通过微物理效应影响辐射和降水的重要基础。然而,前人的观测研究揭示了许多矛盾的现象:既有云滴有效半径随气溶胶减小的 Twomey 效应,也有云滴有效半径随气溶胶增大的反 Twomey 效应,甚至有云滴有效半径随气溶胶先减小后增加的翻转现象,这是多种因素共同影响的结果。针对这些不同的观测结果,本文系统性地总结了其中可能的物理机理,以解释这些现象的产生。主要包括云滴的凝结和蒸发、碰并效应、水汽竞争效应和夹卷效应等机制。具体而言,凝结增长和碰并增长会导致云滴有效半径增大,而云水竞争和夹卷蒸发效应,随着气溶胶增多以及活化气溶胶的增加,则会使云滴有效半径减小。这些物理机制相互作用、彼此竞争,最终共同决定了云滴有效半径随气溶胶浓度变化的结果。基于这些物理机制,我们对过去观测研究中的几种不同现象分别进行了分析和解释。

气溶胶通过改变云特征,能够显著影响弱降水和强降水等极端降水天气现象。这种影响除了与气溶胶和云特征有关外,还与气象条件紧密相关,其中较为重要的是水汽和风切变。研究表明,当水汽充足、风切变较弱时,通常形成强对流云,气溶胶浓度增加时,强对流降水的发生频率和强度均呈现增加趋势;而在水汽不充足、风切变较强的情况下,多形成弱对流云或层状云,且弱降水随气溶胶增多呈现频率减少、强度减弱的现象。进一步研究表明,气溶胶也可以对台风形成的强降水产生影响。具体而言,气溶胶不仅增加了降水的覆盖面积,还使台风降水的最大强度有所减小,同时增加了总降水量,并扩大了台风眼的范围。此外,根据现有研究理论,气溶胶-云相互作用的自然过程对人工影响天气的研究也具有重要意义,尽管本文没有进行深入探讨。

虽然科学界在气溶胶-云降水相互作用及其机理方面已取得显著进展,但气溶胶-云降水相互作用的研究仍然面临着许多困难和挑战,值得未来进一步探索。具体而言,有以下几个方面值得关注:

- 1) 提高观测数据的精度与准度。气溶胶-云降水相互作用是一个快速变化的物理过程。因此,急需开展更多个例和长时间尺度的高精度观测,覆盖不同类型的云和气溶胶情景,提供更为可靠的实验数据。这些数据将为深入理解气溶胶如何影响云和降水提供重要支撑。特别需要增强对云边界、薄云的探测能力,以及提高对云高、云量等宏观特征及云

滴粒径、数浓度等微观特征的测量精度和准确性，以更准确地揭示云内的微观过程，从而更深入地理解气溶胶对云的微物理效应。为此，亟需研发更为可靠和更高精度的观测仪器，特别是那些能够探测传统仪器难以捕捉的云特征和云过程（如强对流云、极端天气云等）的设备，从而填补当前观测空白，提升对云物理过程的精细认知。

- 2) 构建多因素影响下的气溶胶-云-降水相互作用系统框架。气溶胶-云-降水相互作用受到时间、地点、气象条件以及云的不同发展阶段等因素的快速变化影响。因此，深入研究不同情境下的气溶胶-云相互作用规律，采用如聚类分析等方法，显得尤为重要。这不仅有助于形成更加全面的理论框架，揭示气溶胶在不同气候背景下的作用机制，还为现有气候和天气模型的改进提供了坚实的理论基础。
- 3) 优化云参数化方案以提升模式预测能力。面对不同因素影响下的气溶胶-云-降水相互作用多变的规律，亟需构建适应不同气象情境的云相关参数化方案，特别是针对对流云的参数化方案。通过这一方案的优化，可以有效提高现有天气和气候模式的预测能力，从而为防灾减灾、气候变化应对以及生态文明建设等国家重大需求提供有力支持。
- 4) 加快推动人工智能（AI, Artificial Intelligence）在气溶胶-云相互作用研究领域中的应用。随着气象观测数据量的快速增长以及计算机计算能力的提升，人工智能，特别是机器学习和深度学习技术，已成为气溶胶-云相互作用研究中的有力工具。在云计算和大数据技术的支持下，AI 技术能够有效识别气溶胶-云相互作用中的潜在规律，优化模型参数，提高预测精度，并促进实时气象监测与预警系统的发展。同时，AI 技术在云和降水识别、云发展演变跟踪以及降水类型分析等方面的应用有望显著提升对云物理过程的解析能力和准确性。AI 的应用不仅推动了基础研究的深入，还为精准气象预报、灾害预测及应急响应提供了重要支持。

参考文献 (Reference):

- Ackerman A S, Toon O B, Stevens D E, et al. 2000. Reduction of tropical cloudiness by soot [J]. *Science*, 288(5468): 1042-1047. doi:10.1126/science.288.5468.1042
- Albrecht B A. 1989. Aerosols, Cloud Microphysics, and Fractional Cloudiness [J]. *Science*, 245(4923): 1227-1230. doi:10.1126/science.245.4923.1227
- Andrews T, Gregory J M, Forster P M, et al. 2012. Cloud Adjustment and its Role in CO₂ Radiative Forcing and Climate Sensitivity: A Review [J]. *Surv. Geophys.*, 33(3): 619-635. doi:10.1007/s10712-011-9152-0
- Arouf A, Chepfer H, Vaillant de Guélis T, et al. 2022. The surface longwave cloud radiative effect derived from space lidar observations [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 15(12): 3893-3923. doi:10.5194/amt-15-3893-2022
- Bell T L, Rosenfeld D, Kim K-M, et al. 2008. Midweek increase in U.S. summer rain and storm heights suggests air pollution invigorates rainstorms [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 113(D2): D02209. doi:10.1029/2007JD008623
- Bourgeois Q, Bey I. 2011. Pollution transport efficiency toward the Arctic: Sensitivity to aerosol scavenging and source regions [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 116(D8): D08213. doi:10.1029/2010JD015096
- Bulgin C E, Palmer P I, Thomas G E, et al. 2008. Regional and seasonal variations of the Twomey indirect effect as observed by the ATSR-2 satellite instrument [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35(2): L02811. doi:10.1029/2007GL031394
- Che Y, Zhang J, Fang C, et al. 2021. Aerosol and cloud properties over a coastal area from aircraft observations in Zhejiang, China [J]. *Atmos. Environ.*, 267: 118771. doi:10.1016/j.atmosenv.2021.118771
- Chen J, Xu J, Wu Z, et al. 2024. Decreased dust particles amplify the cloud cooling effect by regulating cloud ice formation over the Tibetan Plateau [J]. *Sci. Adv.*, 10(37): eado0885. doi:10.1126/sciadv.ado0885
- Coakley J A, Bernstein R L, Durkee P A. 1987. Effect of Ship-Stack Effluents on Cloud Reflectivity [J]. *Science*, 237(4818): 1020-1022. doi:10.1126/science.237.4818.1020
- Curry J A. 1986. Interactions among Turbulence, Radiation and Microphysics in Arctic Stratus Clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43(1): 90-106. doi:10.1175/1520-0469(1986)043<0090:IATRAM>2.0.CO;2
- Dai A, Genio A D, Fung I Y. 1997. Clouds, precipitation and temperature range [J]. *Nature*, 386: 665-666. doi:10.1038/386665b0
- DeMott P J, Prenni A J, Liu X, et al. 2010. Predicting global atmospheric ice nuclei distributions and their impacts on climate [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 107(25): 11217-11222. doi:10.1073/pnas.0910818107
- Du Y, Liu D, Zhao D. 2024. Microphysical view of the development and ice production of mid-latitude stratiform clouds with embedded convection during an extratropical cyclone [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 24(23): 13429-13444. doi:10.5194/acp-24-13429-2024
- 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 J, Mao J. 2008. Progress in researches on interaction between aerosol and cloud .*Advances in Earth Science (in Chinese)*, 23(3): 252-261. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2008.03.0252
- Fan J, Yuan T, Comstock J M, et al. 2009. Dominant role by vertical wind shear in regulating aerosol effects on deep convective clouds [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 114: D22206. doi:10.1029/2009JD012352
- Fan J, Rosenfeld D, Zhang Y, et al. 2018. Substantial convection and precipitation enhancements by ultrafine aerosol particles [J]. *Science*, 359(6374): 411-418. doi:10.1126/science.aan8461
- Feingold G, Remer L A, Ramaprasad J, et al. 2001. Analysis of smoke impact on clouds in Brazilian biomass burning regions: An extension of Twomey's approach [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 106(D19): 22907-22922. doi:10.1029/2001JD000732
- Feng T, Yuan T, Cao J, et al. 2023. The influence of dust on extreme precipitation at a large city in North China [J]. *Sci. Total Environ.*, 901: 165890. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.165890
- Ferek R J, Hegg D A, Hobbs P V, et al. 1998. Measurements of ship-induced tracks in clouds off the Washington coast [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 103(D18): 23199-23206. doi:10.1029/98JD02121
- 傅云飞. 2018. 云-降水遥感研究现状及夏季东亚云-降水研究思考 [J]. *暴雨灾害*, 37(06): 493-501. Fu Y.

2018. Research actuality of remote sensing on cloud precipitation and reflections on summer East Asian cloud precipitation [J]. *Torrential Rain and Disasters* (in Chinese), 37(6):493-501. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.06.001
- Garrett T J, Zhao C, Dong X, et al. 2004. Effects of varying aerosol regimes on low-level Arctic stratus [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31(17): L17105. doi:10.1029/2004GL019928
- Garrett T J, Zhao C. 2006. Increased Arctic cloud longwave emissivity associated with pollution from mid-latitudes [J]. *Nature*, 440(7085): 787-789. doi:10.1038/nature04636
- Garrett T J, Maestas M M, Krueger S K, et al. 2009. Acceleration by aerosol of a radiative - thermodynamic cloud feedback influencing Arctic surface warming [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36(19): L19804. doi:10.1029/2009gl040195
- Garrett T J, Zhao C, Novelli P C. 2010. Assessing the relative contributions of transport efficiency and scavenging to seasonal variability in Arctic aerosol [J]. *Tellus Ser. B-Chem. Phys. Meteorol.*, 62(3): 190-196. doi:10.1111/j.1600-0889.2010.00453.x
- Guo J, Deng M, Lee S S, et al. 2016. Delaying precipitation and lightning by air pollution over the Pearl River Delta. Part I: Observational analyses [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121(11): 6472-6488. doi:10.1002/2015jd023257
- Guo J, Su T, Li Z, et al. 2017. Declining frequency of summertime local - scale precipitation over eastern China from 1970 to 2010 and its potential link to aerosols [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 44(11): 5700-5708. doi:10.1002/2017gl073533
- Guo J, Su T, Chen D, et al. 2019. Declining Summertime Local - Scale Precipitation Frequency Over China and the United States, 1981 - 2012: The Disparate Roles of Aerosols [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 46(22): 13281-13289. doi:10.1029/2019gl085442
- Guo J, Luo Y, Yang J, et al. 2022. Effects of anthropogenic and sea salt aerosols on a heavy rainfall event during the early-summer rainy season over coastal Southern China [J]. *Atmos. Res.*, 265: 105923. doi:10.1016/j.atmosres.2021.105923
- Hartmann D L, Larson K. 2002. An important constraint on tropical cloud - climate feedback [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29(20): 12-1-12-4. doi:10.1029/2002GL015835
- Huang J, Lin B, Minnis P, et al. 2006. Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33(19): L19802. doi:10.1029/2006GL026561
- Huang J, Wang T, Wang W, et al. 2014. Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119(19): 11398-11416. doi:10.1002/2014JD021796
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 996pp.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1535pp.
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2338pp.
- Johnson B T, Shine K P, Forster P M. 2004. The semi-direct aerosol effect: Impact of absorbing aerosols on marine stratocumulus [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 130(599): 1407-1422. doi:10.1256/qj.03.61
- Khain A P, BenMoshe N, Pokrovsky A. 2008. Factors Determining the Impact of Aerosols on Surface Precipitation from Clouds: An Attempt at Classification [J]. *J. Atmos. Sci.*, 65(6): 1721-1748. doi:10.1175/2007JAS2515.1
- Kim B-G, Schwartz S E, Miller M A, et al. 2003. Effective radius of cloud droplets by ground-based remote sensing: Relationship to aerosol [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 108(D23): 4740. doi:10.1029/2003JD003721

- King M D, Platnick S, Menzel W P, et al. 2013. Spatial and Temporal Distribution of Clouds Observed by MODIS Onboard the Terra and Aqua Satellites [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 51(7): 3826-3852. doi:10.1109/TGRS.2012.2227333
- Koren I, Martins J V, Remer L A, et al. 2008. Smoke Invigoration Versus Inhibition of Clouds over the Amazon [J]. *Science*, 321(5891): 946-949. doi:10.1126/science.1159185
- Koren I, Altaratz O, Remer L A, et al. 2012. Aerosol-induced intensification of rain from the tropics to the mid-latitudes [J]. *Nat. Geosci.*, 5(2): 118-122. doi:10.1038/ngeo1364
- Leaitch W R, Isaac G A, Strapp J W, et al. 1992. The relationship between cloud droplet number concentrations and anthropogenic pollution: Observations and climatic implications [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 97(D2): 2463-2474. doi:10.1029/91JD02739
- Lee S S, Donner L J, Phillips V T J, et al. 2008. The dependence of aerosol effects on clouds and precipitation on cloud-system organization, shear and stability [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 113(D16): D16202. doi:10.1029/2007JD009224
- Lee S S. 2011. Dependence of aerosol-precipitation interactions on humidity in a multiple-cloud system [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 11(5): 2179-2196. doi:10.5194/acp-11-2179-2011
- Lee H, Yum S S, Lee S-S. 2014. A modeling study of the aerosol effects on ice microphysics in convective cloud and precipitation development under different thermodynamic conditions [J]. *Atmos. Res.*, 145: 112-129. doi:10.1016/j.atmosres.2014.03.022
- Leroy D, Monier M, Wobrock W, et al. 2006. A numerical study of the effects of the aerosol particle spectrum on the development of the ice phase and precipitation formation [J]. *Atmos. Res.*, 80(1): 15-45. doi:10.1016/j.atmosres.2005.06.007
- Li Z, Niu F, Fan J, et al. 2011. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation [J]. *Nat. Geosci.*, 4(12): 888-894. doi:10.1038/ngeo1313
- Li Z, Wang Y, Guo J, et al. 2019. East Asian Study of Tropospheric Aerosols and their Impact on Regional Clouds, Precipitation, and Climate (EAST - AIRCPC) [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124(23): 13026-13054. doi:10.1029/2019jd030758
- Lindsey D T, Fromm M. 2008. Evidence of the cloud lifetime effect from wildfire-induced thunderstorms [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35(22): L22809. doi:10.1029/2008GL035680
- Liou K-N, Ou S-C. 1989. The role of cloud microphysical processes in climate: An assessment from a one-dimensional perspective [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 94(D6): 8599-8607. doi:10.1029/JD094iD06p08599
- Liu H, Guo J, Koren I, et al. 2019. Non-Monotonic Aerosol Effect on Precipitation in Convective Clouds over Tropical Oceans [J]. *Sci. Rep.*, 9(1): 7809. doi:10.1038/s41598-019-44284-2
- Liu R, Liu S C, Cicerone R J, et al. 2015. Trends of extreme precipitation in eastern China and their possible causes [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32: 1027-1037. doi:10.1007/s00376-015-5002-1
- Lohmann U, Feichter J. 1997. Impact of sulfate aerosols on albedo and lifetime of clouds: A sensitivity study with the ECHAM4 GCM [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 102(D12): 13685-13700. doi:10.1029/97JD00631
- Min Q-L, Li R, Lin B, et al. 2009. Evidence of mineral dust altering cloud microphysics and precipitation [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 9(9): 3223-3231. doi:10.5194/acp-9-3223-2009
- Morrison H, de Boer G, Feingold G, et al. 2012. Resilience of persistent Arctic mixed-phase clouds [J]. *Nat. Geosci.*, 5(1): 11-17. doi:10.1038/ngeo1332
- Niu F, Li Z. 2012. Systematic variations of cloud top temperature and precipitation rate with aerosols over the global tropics [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 12(18): 8491-8498. doi:10.5194/acp-12-8491-2012
- Öktem R, Romps D M, Varble A C. 2023. No Warm-Phase Invigoration of Convection Detected during GoAmazon [J]. *J. Atmos. Sci.*, 80(10): 2345-2364. doi:10.1175/JAS-D-22-0241.1
- Panicker A S, Pandithurai G, Dipu S. 2010. Aerosol indirect effect during successive contrasting monsoon seasons over Indian subcontinent using MODIS data [J]. *Atmos. Environ.*, 44(15): 1937-1943.

doi:10.1016/j.atmosenv.2010.02.015

- Peixoto J P, Oort A H. 1992. Physics of climate [M]. New York, United States: American Institute of Physics, 520pp.
- 彭杰. 2015. 上海及周边地区气溶胶对云和降水的影响初探 [J]. 暴雨灾害, 34(04): 324-334. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2015.04.005.
- Peng J. 2015. Tentative discussion on the impact of aerosol on cloud and precipitation over Shanghai and its surrounding areas [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 34(4): 324-334. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2015.04.005
- Prenni A J, Harrington J Y, Tjernström M, et al. 2007. Can Ice-Nucleating Aerosols Affect Arctic Seasonal Climate? [J]. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 88(4): 541-550. doi:10.1175/BAMS-88-4-541
- Qian Y, Gong D, Fan J, et al. 2009. Heavy pollution suppresses light rain in China: Observations and modeling [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 114(D7): D00K02. doi:10.1029/2008JD011575
- Qiu Y, Zhao C, Guo J, et al. 2017. 8-Year ground-based observational analysis about the seasonal variation of the aerosol-cloud droplet effective radius relationship at SGP site [J]. Atmos. Environ., 164: 139-146. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.06.002
- Romps D M, Latimer K, Zhu Q, et al. 2023. Air Pollution Unable to Intensify Storms via Warm-Phase Invigoration [J]. Geophys. Res. Lett., 50(2): e2022GL100409. doi:10.1029/2022GL100409
- Rosenfeld D. 1999. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall [J]. Geophys. Res. Lett., 26(20): 3105-3108. doi:10.1029/1999gl006066
- Rosenfeld D. 2000. Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution [J]. Science, 287(5459): 1793-1796. doi:10.1126/science.287.5459.1793
- Rosenfeld D, Dai J, Yu X, et al. 2007. Inverse Relations Between Amounts of Air Pollution and Orographic Precipitation [J]. Science, 315(5817): 1396-1398. doi:10.1126/science.1137949
- Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, et al. 2008. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? [J]. Science, 321(5894): 1309-1313. doi:10.1126/science.1160606
- Rossow W B, Schiffer R A. 1999. Advances in Understanding Clouds from ISCCP [J]. Bull. Am. Meteorol. Soc., 80(11): 2261-2288. doi:10.1175/1520-0477(1999)080<2261:AIUCFI>2.0.CO;2
- Shao H, Liu G. 2005. Why is the satellite observed aerosol's indirect effect so variable? [J]. Geophys. Res. Lett., 32(15): L15802. doi:10.1029/2005GL023260
- Sheffield A M, Saleeby S M, van den Heever S C. 2015. Aerosol-induced mechanisms for cumulus congestus growth [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 120(17): 8941-8952. doi:10.1002/2015JD023743
- Shiogama H, Ogura T. 2014. Clouds of uncertainty [J]. Nature, 505(7481): 34-35. doi:10.1038/505034a
- Stephens G L. 2005. Cloud Feedbacks in the Climate System: A Critical Review [J]. J. Clim., 18(2): 237-273. doi:10.1175/JCLI-3243.1
- Storer R L, van den Heever S C, Stephens G L. 2010. Modeling Aerosol Impacts on Convective Storms in Different Environments [J]. J. Atmos. Sci., 67(12): 3904-3915. doi:10.1175/2010JAS3363.1
- Stubenrauch C J, Rossow W B, Kinne S, et al. 2013. Assessment of Global Cloud Datasets from Satellites: Project and Database Initiated by the GEWEX Radiation Panel [J]. Bull. Am. Meteorol. Soc., 94(7): 1031-1049. doi:10.1175/BAMS-D-12-00117.1
- Sun B, Groisman P Y, Bradley R S, et al. 2000. Temporal Changes in the Observed Relationship between Cloud Cover and Surface Air Temperature [J]. J. Clim., 13(24): 4341-4357. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<4341:TCITOR>2.0.CO;2
- Sun Y, Zhao C. 2021. Distinct impacts on precipitation by aerosol radiative effect over three different megacity regions of eastern China [J]. Atmos. Chem. Phys., 21(21): 16555-16574. doi:10.5194/acp-21-16555-2021
- Sun Y, Zhao C, Fan H. 2024. Microphysical Characteristics of Precipitation Over Eastern China and Its Coastal Regions [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 129(9): e2023JD039817. doi:10.1029/2023jd039817
- Tang J, Wang P, Mickley L J, et al. 2014. Positive relationship between liquid cloud droplet effective radius and aerosol optical depth over Eastern China from satellite data [J]. Atmos. Environ., 84: 244-253.

doi:10.1016/j.atmosenv.2013.08.024

- Tao W-K, Li X, Khain A, et al. 2007. Role of atmospheric aerosol concentration on deep convective precipitation: Cloud - resolving model simulations [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 112(D24): D24S18. doi:10.1029/2007jd008728
- Twomey S. 1974. Pollution and the planetary albedo [J]. *Atmos. Environ.*, 8(12): 1251-1256. doi:10.1016/0004-6981(74)90004-3
- Wang F, Guo J, Wu Y, et al. 2014. Satellite observed aerosol-induced variability in warm cloud properties under different meteorological conditions over eastern China [J]. *Atmos. Environ.*, 84: 122-132. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.11.018
- Wang F, Guo J, Zhang J, et al. 2015. Multi-sensor quantification of aerosol-induced variability in warm clouds over eastern China [J]. *Atmos. Environ.*, 113: 1-9. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.04.063
- Wang H, Tan Y, Shi Z, et al. 2023. Diurnal differences in the effect of aerosols on cloud-to-ground lightning in the Sichuan Basin [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 23(4): 2843-2857. doi:10.5194/acp-23-2843-2023
- Wang Y, Wan Q, Meng W, et al. 2011. Long-term impacts of aerosols on precipitation and lightning over the Pearl River Delta megacity area in China [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 11(23): 12421-12436. doi:10.5194/acp-11-12421-2011
- Wang Y, Lee K-H, Lin Y, et al. 2014. Distinct effects of anthropogenic aerosols on tropical cyclones [J]. *Nat. Clim. Change*, 4(5): 368-373. doi:10.1038/nclimate2144
- Wilcox E M. 2012. Direct and semi-direct radiative forcing of smoke aerosols over clouds [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 12(1): 139-149. doi:10.5194/acp-12-139-2012
- Xiao Z, Zhu S, Miao Y, et al. 2022. On the relationship between convective precipitation and aerosol pollution in North China Plain during autumn and winter [J]. *Atmos. Res.*, 271: 106120. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106120
- 杨薇, 冯文, 李勋. 2017. 微物理过程和积云参数化方案对海南岛秋季暴雨模拟的影响 [J]. *暴雨灾害*, 36(1): 8-17. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2017.01.002. Yang W, Feng W, Li X. 2017. Impacts of microphysical processes and cumulus parameterization sch simulated rainfall in Autumn over the Hainan Island [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 36(1): 8-17. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2017.01.002
- Yang X, Yao Z, Li Z, et al. 2013. Heavy air pollution suppresses summer thunderstorms in central China [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 95-96: 28-40. doi:10.1016/j.jastp.2012.12.023
- Yang Y, Zhao C, Dong X, et al. 2019. Toward understanding the process-level impacts of aerosols on microphysical properties of shallow cumulus cloud using aircraft observations [J]. *Atmos. Res.*, 221: 27-33. doi:10.1016/j.atmosres.2019.01.027.
- Yang Y, Zhao C, Wang Y, et al. 2021. Multi - Source Data Based Investigation of Aerosol - Cloud Interaction Over the North China Plain and North of the Yangtze Plain [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126(19): e2021JD035609. doi:10.1029/2021jd035609
- 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. Atmos.*, 107(D23): 4724. doi:10.1029/2001JD001544
- Yuan T, Li Z, Zhang R, et al. 2008. Increase of cloud droplet size with aerosol optical depth: An observation and modeling study [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 113(D4): D04201. doi:10.1029/2007JD008632
- Zhang Q, Quan J, Tie X, et al. 2011. Impact of aerosol particles on cloud formation: Aircraft measurements in China [J]. *Atmos. Environ.*, 45(3): 665-672. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.10.025
- Zhao A D, Stevenson D S, Bollasina M A. 2019. The role of anthropogenic aerosols in future precipitation extremes over the Asian Monsoon Region [J]. *Clim. Dyn.*, 52(9): 6257-6278. doi:10.1007/s00382-018-4514-7
- Zhao B, Liou K N, Gu Y, et al. 2018. Impact of aerosols on ice crystal size [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 18(2): 1065-1078. doi:10.5194/acp-18-1065-2018
- Zhao C, Klein S A, Xie S, et al. 2012. Aerosol first indirect effects on non-precipitating low-level liquid cloud

- properties as simulated by CAM5 at ARM sites [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39(8): L08806. doi:10.1029/2012GL051213
- Zhao C, Garrett T J. 2015. Effects of Arctic haze on surface cloud radiative forcing [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 42(2): 557-564. doi:10.1002/2014GL062015
- Zhao C, Qiu Y, Dong X, et al. 2018a. Negative Aerosol-Cloud Relationship From Aircraft Observations Over Hebei, China [J]. *Earth Space Sci.*, 5(1): 19-29. doi:10.1002/2017EA000346
- Zhao C, Lin Y, Wu F, et al. 2018b. Enlarging Rainfall Area of Tropical Cyclones by Atmospheric Aerosols [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 45(16): 8604-8611. doi:10.1029/2018GL079427
- Zhao C, Chen Y, Li J, et al. 2019a. Fifteen - year statistical analysis of cloud characteristics over China using Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer observations [J]. *Int. J. Climatol.*, 39(5): 2612-2629. doi:10.1002/joc.5975
- Zhao C, Zhao L, Dong X. 2019b. A Case Study of Stratus Cloud Properties Using In Situ Aircraft Observations over Huanghua, China [J]. *Atmosphere*, 10(1): 19. doi:10.3390/atmos10010019
- Zhao X, Zhao C, Yang Y, et al. 2022. Distinct changes of cloud microphysical properties and height development by dust aerosols from a case study over Inner-Mongolia region [J]. *Atmos. Res.*, 273: 106175. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106175
- Zhu H, Li R, Yang S, et al. 2023. The impacts of dust aerosol and convective available potential energy on precipitation vertical structure in southeastern China as seen from multisource observations [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 23(4): 2421-2437. doi:10.5194/acp-23-2421-2023
- 周广强, 赵春生, 秦瑜. 2005. 云滴谱的不确定性对中尺度降水的影响 [J]. *热带气象学报*, 21(06): 605-614.
- Zhou G, Zhao C, Qin Y. 2005. Impact of cloud droplets spectral uncertainty on the mesoscale precipitation [J]. *Journal of Tropical meteorology (in Chinese)*, 21(06): 605-614. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2005.06.006
- 周秀骥, 顾震潮. 1963. 关于云雾微结构和降水过程理论的若干问题 [J]. *科学通报*, 8(06): 1-7. Zhou X, Gu Z. 1963. A number of issues on the cloud microstructure and precipitation on process theory [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 8(6): 1-7. doi:10.1360/csb1963-8-6-1