

不同污染背景下云滴谱离散度对云降水模拟影响的个例研究

李丹¹, 徐晓齐^{2,3}, 贾星灿⁴, 陆春松¹, 邱玉珺¹, 邵乃夫¹, 邹沁垚¹

1 南京信息工程大学, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 南京气象科技创新研究院, 南京 210008

3 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210041

4 北京城市气象研究院, 北京 10089

摘要: 云滴谱离散度是云雨自动转化过程参数化中不可忽视的重要参数, 对地面降水有着重要的影响。本文利用 WRF-Chem (The Weather Research and Forecast coupled with Chemistry) 模式, 对发生在 2019 年 1 月 3 日至 6 日长江中下游地区的一次降水过程进行了模拟。在清洁和污染的气溶胶背景下, 设定不同的云滴谱离散度的数值 (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0), 研究云降水微物理的变化。结果表明, 该个例降水主要来源于云雨自动转化以及云雨碰并过程。在清洁条件下的地面累计降水量大于在污染条件下的累计降水量, 这是因为在清洁条件下云滴数浓度小, 有利于云雨自动转化以及云雨碰并过程。虽然云雨自动转化以及云雨碰并过程占主导, 但导致地面累计降水量随云滴谱离散度增大而增大的主要原因是: 随着云滴谱离散度的增大, 冰粒子质量浓度增大, 导致融化过程增强, 产生更多的雨滴, 从而增强地表降水。所得结果将提高我们对云降水对气溶胶和离散度响应过程的理论认识。

关键词: WRF-Chem 模式; 云滴谱离散度; 气溶胶; 云微物理过程。

文章编号 2021190B

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2201.21190

Case Study about the Influencing Mechanisms of Cloud Droplet Spectral

收稿日期: 2021-10-08; 网络预出版日期:

作者简介: 李丹, 女, 1995 年 11 月, 硕士研究生, 主要从事云降水物理方向研究。Email: lidan_nuist@163.com

通讯作者: 邱玉珺, 女, 1975 年 7 月, 教授, 博导, 主要研究大气气溶胶及云物理研究。Email: qyj@nuist.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金 (41822504, 42175099, 42075073, 41975181)

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant41822504, 42175099, 42075073, 41975181)

Dispersion on Cloud and Precipitation Simulation under Different Pollution Backgrounds

LI Dan¹, XU Xiaoqi^{2,3}, JIA Xingcan⁴, LU Chunsong¹, QIU Yujun¹, SHAO Naifu¹, and ZOU Qingyao¹

1 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, and Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210008

3 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210008

4 Institute of Urban Meteorology, Chinese Meteorological Administration, Beijing, 10089

Abstract: The dispersion of cloud droplet spectral dispersion is an important parameter that cannot be ignored in the parameterization of autoconversion, and has an important influence on surface precipitation. In this study, the Weather Research and Forecast coupled with chemistry (WRF-Chem) model was used to simulate a precipitation process in the middle and lower reaches of the Yangtze River from January 3, 2019, to January 6, 2019. Different values of cloud droplet spectral dispersion (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0) were set to study the microphysical changes of cloud and precipitation under the clean and polluted backgrounds. The results show that the precipitation in this case mainly comes from the autoconversion from cloud droplets to rain and the accretion of cloud droplets by rain. The accumulated precipitation under the clean condition is greater than that under the polluted condition because the concentration of cloud droplets is smaller under the clean condition, which is beneficial to autoconversion and accretion. Although the autoconversion and accretion are dominant during precipitation processes, the main reasons leading to the increase of accumulated precipitation with the increase of cloud droplet spectral dispersion are as follows: With the increase of cloud droplet spectral dispersion, the mass concentration of ice particles increases, which leads to the enhancement of melting process and more raindrops, thus enhancing surface precipitation. The results will improve the theoretical understanding of the response of cloud and precipitation process to aerosol and cloud droplet spectral dispersion.

Keywords: WRF-Chem model; Cloud droplet spectral dispersion; Aerosol; Cloud microphysical process.

1. 引言

云对于地球系统的能量平衡和水循环有着非常重要的作用(Dessler, 2010 ; Li et al., 2017; Zhao et al., 2020)。但是云对气候系统的影响又是相当复杂且难以理解的(IPCC, 2021), 如何在模式中准确地表征云过程至关重要。云滴谱离散度 (ε) 是云微物理过程参数化的一个重要参数, 定义为云的标准差 (σ) 与平均半径 ($\bar{r}$) 的比值, 是衡量云滴尺度分布相对离散程度的物理量。离散度数值大意味着不同尺度的云滴同时存在, 离散度小则表明不同云滴的尺度相当。云滴谱离散度不仅与云滴数浓度有关, 还与云水含量息息相关(Liu et al., 2008 ; Lu et al., 2020; Martins and Dias, 2009 ; Tas et al., 2012; Wang et al., 2020; Wang et al., 2021; 朱磊等, 2020)。云滴谱离散度一方面通过影响云滴的有效半径从而影响辐射(Liu and Daum, 2002 ; Peng and Lohmann, 2003 ; Rotstayn and Liu, 2002 ; 解小宁等, 2015; Xie et al., 2017 ; Zhao et al., 2006a); 另一方面, 云滴谱离散度通过影响云雨自动转化过程, 影响降水过程(Liu, 2005 ; Liu et al., 2020 ; Wang et al., 2020 ; Xie and Liu, 2011 ; Xie and Liu, 2012 ; 周广强等, 2005)。

云滴谱离散度受很多因素影响, 表现十分复杂。解小宁等(2016)分析一次降水性层状云飞机观测资料发现, 当液水含量大于 0.01 g/cm^3 时, 云滴谱离散度随云滴数浓度呈递减关系。Lu et al. (2012)通过分析浅积云飞机资料, 认为云滴谱离散度与云滴数浓度以及云中的垂直速度均呈负相关; Wang et al. (2021)也发现当垂直速度增大时离散度变小。Chen et al. (2016)在固定垂直速度的情况下, 在气溶胶控制区, 离散度随着气溶胶数浓度的增大而增大, 在垂直速度控制区, 离散度随着气溶胶数浓度的增大而减小。此外, Tas et al. (2012)研究发现云滴谱离散度与云滴体积半径呈正相关关系, 这与碰并过程有关。离散度的变化会进一步影响模式的降水模拟水平 (邓玮等, 2019; Xu et al., 2020)。例如, Xie et al. (2018)将包含云滴谱离散度的云雨自动转化方案耦合进模式中发现其可以有效地增强了大尺度降水; Wang et al. (2020)在气候模式中耦合不同的云滴谱离散度参数化方案, 结果表明较大的云滴谱离散度对应着更快的云雨自动转化率, 从而对应着更强的降水。Xie and Liu (2011)在中尺度天气预报模式 WRF (The Weather Research and Forecasting Model) 中设定不同的云滴谱离散度数值和气溶胶浓度, 模拟了一个理想降水个例, 分析离散度对云雨自动转化过程的影响。他们发现

在清洁的背景下,随着云滴谱离散度的增大,地面降水减少;在半污染条件下,随着离散度的增大,地面降水先减少后增加;在污染背景下,地面降水一直增加。这表明云滴离散度对降水的影响在不同的气溶胶背景下表现并不相同。气溶胶会影响云滴谱离散度,改变云的微物理过程从而影响降水(Yang et al., 2019)。但气溶胶对地面降水是抑制还是促进作用也仍未有定论(Li et al., 2008 ; Li et al., 2019 ; 宿兴涛等, 2016 ; 苏艳等, 2016 ; Storer et al., 2010 ; 肖辉和银燕, 2011; Zhao et al., 2006b; Zhao et al., 2018; Zhao et al., 2019; Zhou et al., 2020)。例如, Rosenfeld (1999)研究发现污染地区的云需要发展到更高的位置才会产生降水,因此气溶胶的增加会抑制暖雨的过程。不同的是, Wang et al. (2011)和石睿等(2015)的研究表明,在气溶胶浓度增加的条件下,地面降水强度总体增加,其中弱降水和中等强度的降水被抑制,而强降水增加。因此,云滴谱离散度、气溶胶和降水之间的关系还具有较大的不确定性。

正如解小宁等(2015)所指出的,云滴谱离散度的研究已经有了一定的进展。虽然对云滴谱离散度怎样影响暖云降水已经有了一定的认知,但是在不同气溶胶背景(清洁、污染)下以及涉及到冰相过程时云滴谱离散度究竟怎样影响降水的研究还较少。因此有必要进一步深入地研究不同气溶胶背景下云滴谱离散度对云和降水的影响,特别是冷云和暖云之间的相互作用。此外,常用的 WRF 模式中对气溶胶浓度的表征往往是通过假定不同的云凝结核浓度来实现的,与实际情况存在一定的差异。

基于上述不足之处,本文将包含云滴谱离散度参数化的云雨自动转化方案(Liu et al., 2006b)耦合入 Morrison 微物理方案(Morrison et al., 2008)中,并使用 WRF-Chem 模式对发生在中国长江中下游冬季的一次降水过程进行模拟, WRF-Chem 是一个气象和化学过程双向耦合的模式,能够更真实地模拟不同污染情况中气溶胶对云滴的影响,以更好地分析不同污染背景下,离散度对云的微物理性质以及地面降水的影响,并揭示内在的物理机理,尤其是暖云和冷云过程之间的相互作用。

2. 模式介绍和设置

2.1 模式介绍

研究采用 WRF-Chem 4.0.3 模式版本和 $1^\circ \times 1^\circ$ 每 6 小时一次的全球再分析资料,可以在线地模拟气溶胶-云-辐射-降水相互作用。如图 1 所示,模式采用两层嵌套,以 $(29.5^\circ \text{ N}, 115.0^\circ \text{ E})$ 为中心, d02 主要覆盖了长江中下游地区。两层嵌套的水平分辨率分别是 9 km 和 3 km,对应的网格数分别是 300×300 和 349×349 ;垂直方向上划分了 32 层,采用上疏下

密的方式，模式的顶层为 50 hpa。模拟从北京时间 2019 年 1 月 2 日 08 时开始至 1 月 6 日 08 时结束，为了使气溶胶浓度累积，并使初始条件对后续降水分析的影响最小化，将前 36 小时作为 spin-up 时间。后续的分析时段为 1 月 3 日 20 时至 1 月 6 日 08 时，对应着该区域一次降水过程。此外，考虑到 d02 中部分区域存在降雪过程，为了排除降雪过程的干扰，本研究分析将针对图 1（b）中的阴影部分进行。本研究使用的微物理方案为 Morrison 双参微物理方案(Morrison and Grabowski, 2008)，其中云雨自动转化参数化未考虑云滴谱离散度。为了研究云滴谱离散度对云降水相关过程的影响，本研究参照 Xie and Liu (2011)，引入了包含云滴谱离散度的云雨自动转化公式(Liu et al., 2006b)：

$$P = P_0 T \quad (1)$$

$$P_0 = k \left[\frac{(1+3\varepsilon^2)(1+4\varepsilon^2)(1+5\varepsilon^2)}{(1+\varepsilon^2)(1+2\varepsilon^2)} \right] N_c^{-1} L_c^3 \quad (2)$$

$$T = [1 - \exp(-x_c^\mu)] \quad (3)$$

其中 P 代表云雨自动转化率 ($\text{g cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$)， P_0 表示速率函数， T 是阈值函数。 $k=1.1 \times 10^{10} \text{ g}^2 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ， N_c 和 L_c 分别表示云滴数浓度 (cm^{-3}) 以及云水含量 (g cm^{-3})，其中 $x_c = 9.7 \times 10^{-17} N_c^{3/2} L_c^{-2}$ ， μ 取值为 2(Liu et al., 2006a)。类似于 Xie and Liu (2011) 的做法，本文在 WRF-chem 模式中设定不同的云滴谱离散度的数值 ($\varepsilon = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$)，以研究不同气溶胶背景下云滴谱离散度对云降水的影响。其他的物理和化学方案设置见表 1。

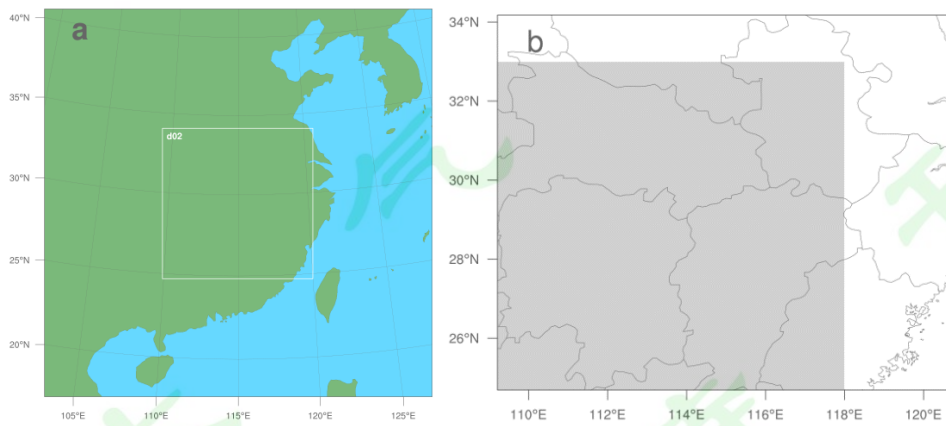


图 1. (a) 模式嵌套设置；(b) d02 中的阴影部分为实际研究区域。

Fig. 1 (a) Model nesting settings; (b) The shaded part is the actual research area in d02.

表 1 WRF-Chem 模式设置

Table 1 WRF-Chem model settings

设置方案	d01	d02
积云参数化方案	Grell 3D(Grell, 1993)	无
化学机制	RADM2(Stockwell et al., 1990)	
气溶胶模块	MADE/SOGARM(Ackermann et al., 1998 ; Schell et al., 2001)	
微物理方案	Morrison (Morrison and Grabowski, 2008)	
长波辐射	RRTM(Mlawer et al., 1997)	
短波辐射	Goddard(Chou and Suarez, 1994)	
近地面方案	Monin-Obukhov(Paulson, 1970)	
边界层方案	YSU(Hong et al., 2006)	

2.2 气溶胶背景设置

与 Jia et al. (2018)类似，在 2016 年 MEIC (Multi-resolution Emission Inventory for China) 源排放的浓度基础上，我们将其乘以 0.05 倍以减少排放源强度，通过两组不同排放源浓度实验的对比研究，分析不同气溶胶浓度条件下，离散度对云微物理和降水的影响机理。如图 2 的箱型图所示，1 倍排放源浓度下 $PM_{2.5}$ 的平均质量浓度是 $34.88 \mu g/m^3$ ，代表城市地区污染的环境条件；排放源浓度乘以 0.05 倍后， $PM_{2.5}$ 的平均质量浓度为 $1.71 \mu g/m^3$ ，且 90%的 $PM_{2.5}$ 浓度小于 $5 \mu g/m^3$ ，接近中国偏远的地区，代表清洁的环境条件。

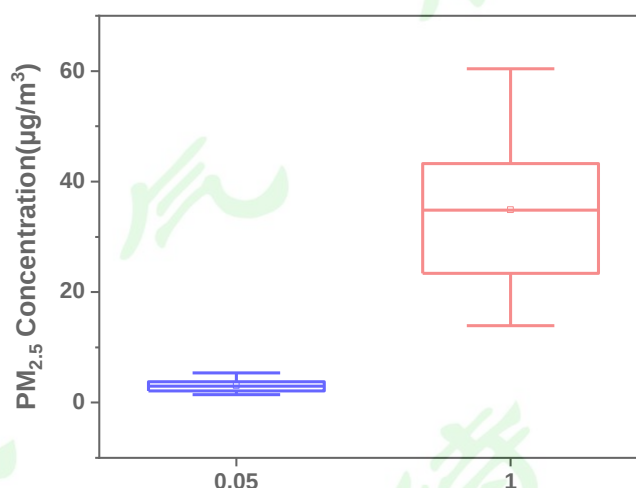


图 2. 在 0.05 倍和 1 倍排放源强度下区域平均的 $PM_{2.5}$ 浓度的箱型图。对于每种情况，上下边缘代表 5%至 95%的范围；宽框代表从 25%到 75%的范围；中心的小正方形代表平均值；

中心线代表中值。

Fig. 2 Box plot of regional average PM_{2.5} concentration at 0.05 time and 1 time emission scenarios. For each scenario, the whisker represents the range from 5% to 95% percentiles; the wide box represents the range from 25% to 75% percentiles; the square and center line represent the mean and median value, respectively.

3. 结果分析

3.1 气溶胶和离散度对地面降水的影响

图 3 和图 4 分别给出了清洁和污染条件下不同云滴谱离散度实验（以 $\varepsilon = 0.1, 0.5, 1.0$ 为例）和观测在 1 月 3 日 20 时到 1 月 6 日 08 时的累计降水分布情况。其中观测数据来自中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水量网格数据集（<http://data.cma.cn/>）。以往研究发现该资料对降水存在一定的低估，主要是对弱降水的低估漏报(苏传程等, 2016)。但是其 24h 的累计降水与气象台站观测数据的相关性可以达到 0.95，并且累计降水的时间越长，评估的效果越好(苏传程等, 2016；俞琳飞等, 2020)。在本研究中注重研究两天半的累计降水，因此，总体而言，该资料是适用于本研究的。

清洁和污染背景下不同云滴谱离散度的模拟结果表明，WRF-Chem 能够基本再现该降水个例的空间分布，降水的整体落区与观测基本吻合，但是各实验的最大降水中心均有所偏移，模拟的降水偏大。Liu et al. (2020)通过与卫星观测资料对比，也发现 WRF-Chem 模拟降水偏大。根据观测资料，计算得到区域累计降水量为 10.5 mm。根据图 5，污染情况下，模拟的区域累计降水量在 12.2 mm 和 12.5 mm 之间。清洁情况下，区域累计降水量在 12.9 mm 和 13.4 mm 之间。因此，污染条件下的降水与实际降水更为接近。为了更全面的评估各实验的模拟效果，使用 HSS（Heidke Skill Score）评分来衡量模拟与观测在空间分布上的偏差 (Barnston, 1992)，并计算了各实验与观测的均方根误差（RMSE）。HSS 评分可以综合判断模拟的效果是否良好，其计算公式如下：

$$HSS = \frac{2(ad-bc)}{(a+c)(c+d)+(a+b)(b+d)} \quad (4)$$

其中 a 表示预报和实况均出现降水次数，b 表示预报出现而实况未出现降水次数，c 表示预报不出现而实况出现降水次数，d 表示预报和实况都未出现降水的次数。a-d 的次数是由观测值 p_o 、模拟值 p_s 、以及阈值 p_t 来决定的（表 2）。在这里将 p_t 设置为 1 mm，吴启树等，(2017)研究中也根据降水的量级将阈值取为 1mm。HSS 评分的取值范围为-1 和 1 之间，评分的值越大，则代表模拟的效果越好。均方根误差的值越小则代表观测和模拟更接近。各实

验的 HSS 和均方根误差均在表 3 中给出，两种评估方法均表明，污染条件下降水的模拟与观测更为接近。此外，随着离散度的增大，模拟与观测的偏差也变大。但此次降水过程模拟效果与观测还是存在一定的偏差。

表 2 计算 HSS 评分的元素列表
Table 2 List of elements for calculating HSS.

	观测值 $p_o > p_t$	观测值 $p_o \leq p_t$
模拟值 $p_s > p_t$	a	b
模拟值 $p_s \leq p_t$	c	d

表 3 清洁和污染条件下在不同云滴谱离散度下均方根误差和 HSS 评分

Table 3 Root mean square error (RMSE) and HSS score of different simulations with different spectral dispersion (0.1, 0.5, and 1.0) under clean and polluted conditions.

	HSS	RMSE
clean- $\varepsilon=0.1$	0.38	0.41
clean- $\varepsilon=0.5$	0.37	0.43
clean- $\varepsilon=1.0$	0.36	0.44
polluted- $\varepsilon=0.1$	0.45	0.35
polluted- $\varepsilon=0.5$	0.43	0.36
polluted- $\varepsilon=1.0$	0.39	0.37

总体而言，云滴谱离散度对地面降水范围影响较小，却能明显地改变降水强度，随着云滴谱离散度的增大，地面降水中心的降水量也越大，这与周广强等(2005)的研究结果一致。除了降水中心降水量增大外，图 5 表明，无论在清洁还是污染条件下，平均地面累计降水量均随云滴谱离散度的增大呈现增大的趋势。值得指出的是，当云滴谱离散度从 0.1 增大到 1 时，清洁条件下地面平均累计降水量增大约 0.5 mm，在污染条件下增大约 0.2 mm，即在清洁情况下增大云滴谱离散度对降水的增加更加明显。此外，从图 5 可以看出，当离散度相同时，清洁条件的平均地面累计降水量大于污染条件下的降水量，约大 0.7 mm。3.2 节将围绕这两个问题展开深入分析：清洁条件下降水强产生的机理和离散度增大促进降水的机理。

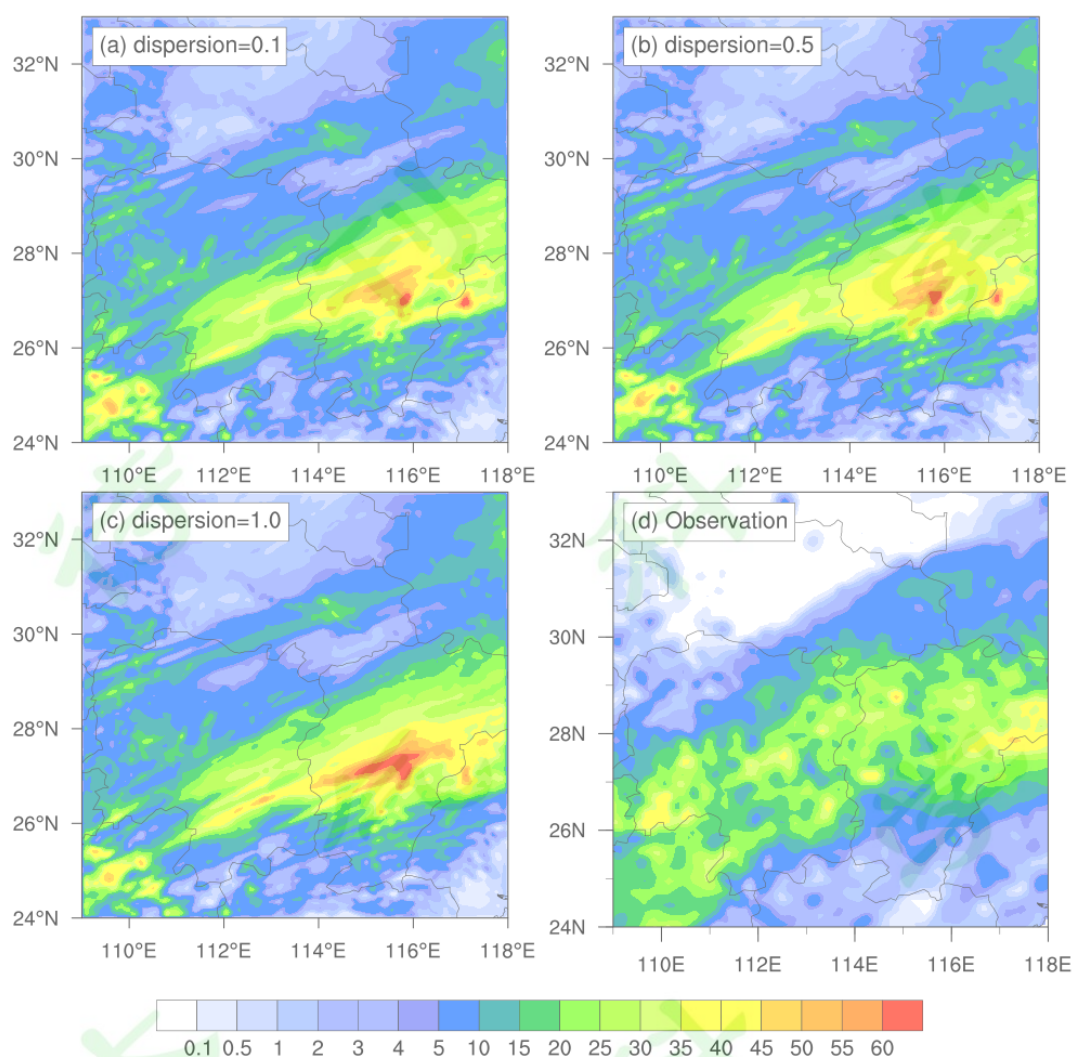


图 3. 1 月 3 日 20 时至 1 月 6 日 08 时污染条件下模拟以及观测的地面累计降水 (mm):
 (a) 离散度=0.1; (b) 离散度=0.5; (c) 离散度=1.0; (d) 观测资料: 中国自动站与 CMORPH
 降水产品融合的逐时降水量网格数据集 (<http://data.cma.cn/>)。

Fig. 3 Accumulated precipitation (mm) from 20: 00 on 3 January to 08: 00 on 6 January from observation and simulations under polluted condition: (a) dispersion=0.1; (b) dispersion=0.5; (c) dispersion=1.0; (d) observation data: Hourly precipitation grid data set integrated with China automatic station and CMORPH precipitation products (<http://data.cma.cn/>).

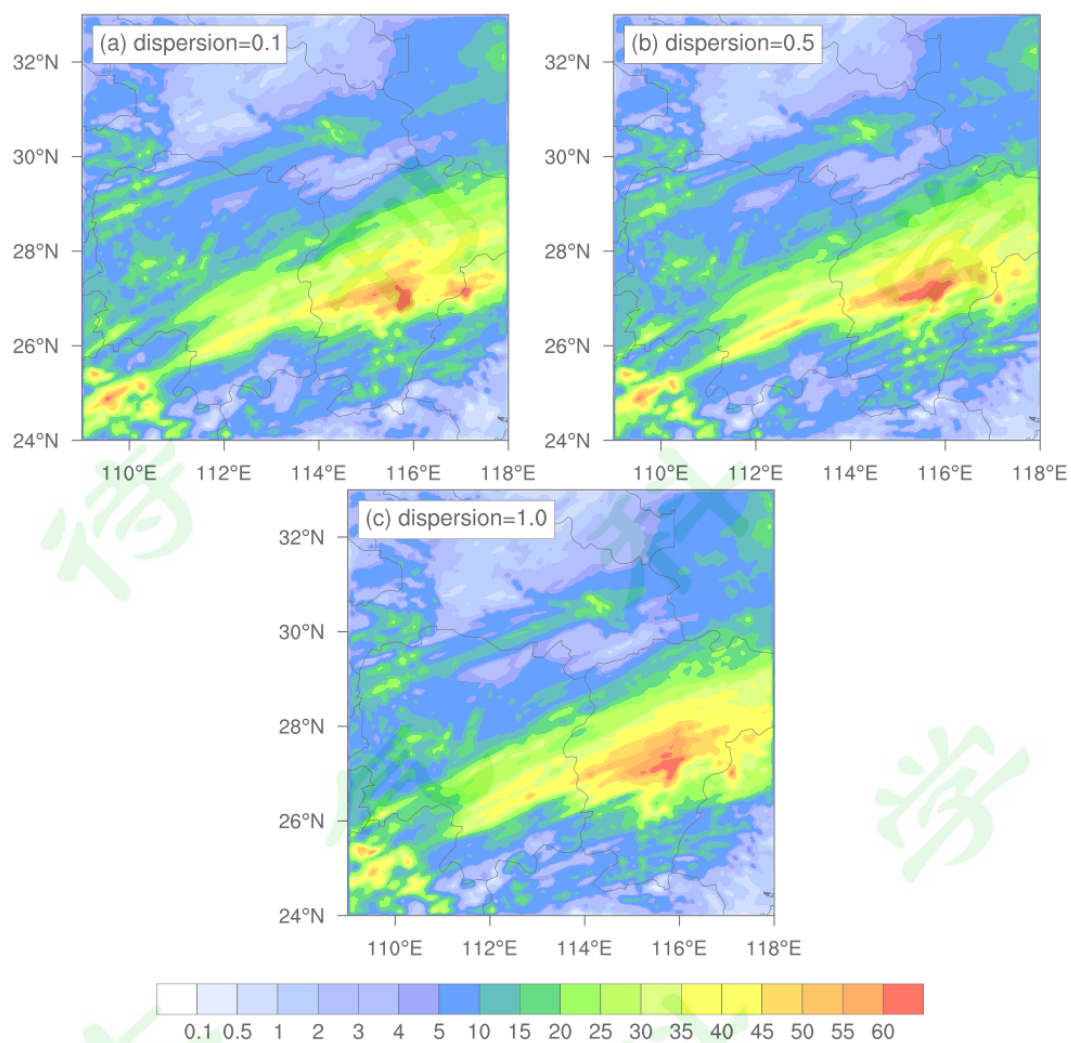


图 4. 1 月 3 日 20 时至 1 月 6 日 08 时清洁条件下模拟的地面累计降水 (mm): (a) 离散度=0.1; (b) 离散度=0.5; (c) 离散度=1.0。

Fig. 4 Simulated accumulated precipitation (mm) under clean condition from 20: 00 on 3 January to 08: 00 on 6 January: (a) dispersion=0.1; (b) dispersion=0.5; (c) dispersion=1.0.

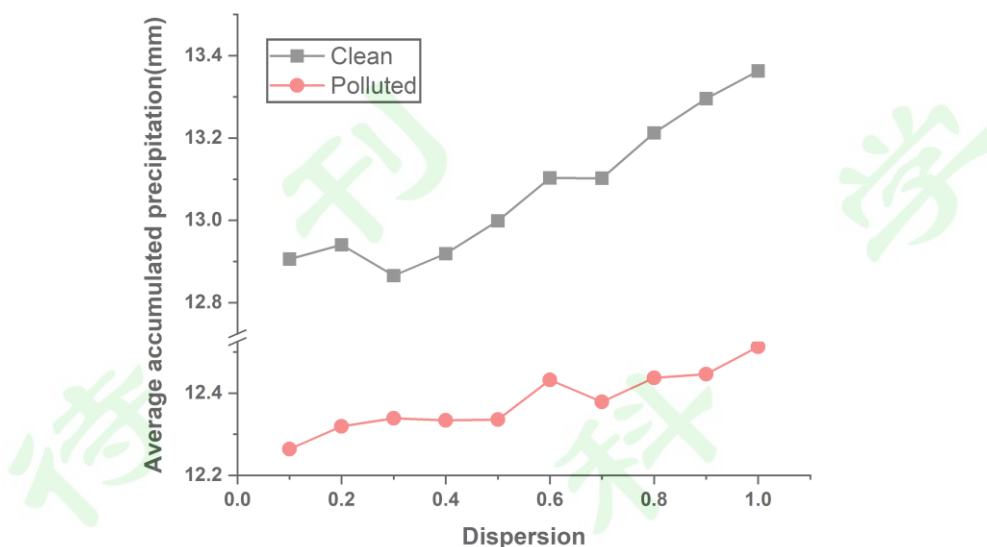


图 5. 清洁和污染实验中平均地面累计降水量随云滴谱离散度的变化。

Fig. 5. Variations of average accumulated precipitation with spectral dispersion under clean and polluted conditions.

3.2 微物理机理分析

降水对气溶胶和云滴谱离散度的响应,涉及到云中的各微物理量及相关的微物理转化过程。气溶胶和云滴谱离散度数值的改变会直接影响云雨自动转化过程,从而引起云内一系列微物理量的改变,并进一步影响云雨之间的碰并,以及冰粒子形成和融化过程,而这些物理过程的改变又会影响云中的微物理量。

3.2.1 清洁条件下降水强的机理

为了研究清洁条件下降水强于污染条件的机理以及平均累计降水量随着云滴谱离散度的增大而增大的原因,我们详细分析了雨滴形成的各项微物理过程。表 4 给出在清洁条件下离散度为 0.5 时各个微物理过程的转化率,以及它们对雨水源汇项的贡献。云雨自动转化 (PRC)、云雨碰并 (PRA)、冰粒子融化 (MELT) 为雨的源项,雨水蒸发 (PRE)、雪碰并雨水形成雪 (PRACS)、霰碰并雨水形成霰 (PRACG) 为汇项。值得指出的是,雨滴的源减去汇等于雨滴沉降到地表产生的降水。本文关注的是云内和云下的微物理转化过程,所以没有计算地表的降水,因此正负变化值的绝对值不相等。PRA 是雨最主要的源,PRC 和 MELT 的贡献相当。雨的汇主要是 PRE,远高于其他两项。所以在图 6 中给出了 4 个主要微物理过程,即 PRA、PRC、MELT 和 PRE。其中图 6 (a) 为污染条件下离散度为 0.5 时,雨滴主要源汇项的垂直廓线,其他离散度和清洁条件下的结果类似。图 6b、c、d 为整层累积,将云

滴谱离散度从 0.1-1.0 做平均,可知清洁和污染条件下云雨自动转化均值分别为 107.7 和 81.0 kg/s, 云雨碰并的均值分别为 526.2 和 512.1 kg/s, 融化的均值分别为 80.4 和 71.8 kg/s。从均值的大小可以看出,不论是在清洁还是污染条件下云雨自动转化和云雨碰并对降水的贡献均大于冰粒子融化对降水的贡献,与图 6 (a) 中雨滴各源项的垂直廓线相吻合。这与刘圣楠和崔晓鹏(2018)和杨宗甄等(2012) 的研究结果一致,但与另一些研究结果不同,如肖辉和银燕 (2011) 对一次污染条件下降水过程的研究显示雪和霰是雨水的主要来源。占主导的微物理过程不同应与具体的降水系统有关。

鉴于此次降水过程中,云雨自动转化和云雨碰并对降水贡献大于冰粒子融化对降水的贡献,因此分析不同污染条件下降水强弱的机理时,我们重点分析贡献大的微物理过程。清洁条件下的云雨自动转化和云雨碰并过程整层累积转化率均大于污染条件下的结果 (图 6b、c),使得清洁条件下的累计降水大于污染条件下的降水。进一步分析表明,在给定云滴谱离散度的条件下,云滴数浓度和质量浓度随着气溶胶浓度的增大而增大 (图 7a、c); 对于雨滴来说,雨滴数浓度和质量浓度随着气溶胶粒子的增多而减小 (图 7b、d)。这是因为,当气溶胶粒子增多时,有更多的气溶胶被活化,云滴半径减小,阻碍了云雨自动转化过程,这在其他数值模拟中也得到了证实(如 Wang, 2005 ; 肖辉和银燕,2011)。因此,清洁条件具有更大的云雨自动转化率和云雨碰并速率 (图 6 b、c), 导致清洁条件下的地面累计降水更多 (图 5)。

表 4 雨微物理过程源汇项 (kg/s)

Table 4 Source and sink items of rain microphysical processes (kg/s)

源汇项		源项		汇项		
微物理过程	PRC	PRA	MELT	PRE	PRACS	PRACG
转化率	107.0	524.3	79.7	-138.0	-16.4	-10.2
贡献	15.0%	73.7%	11.3%	-83.8%	-10.0%	-6.2%

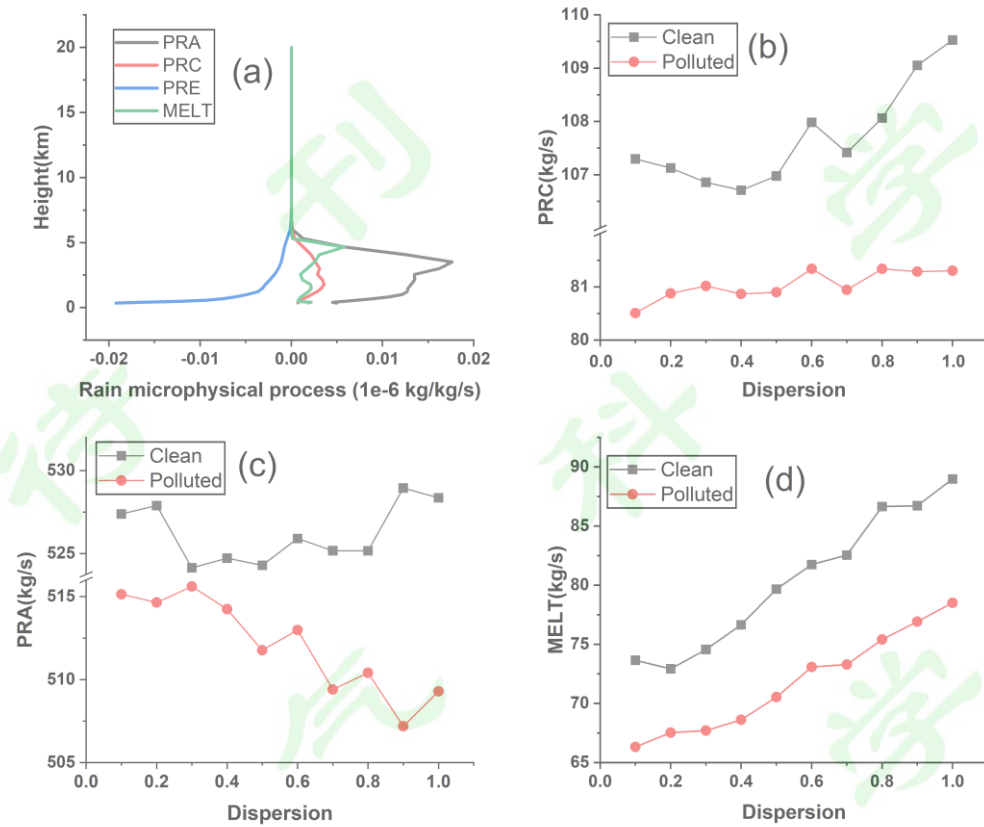


图 6. (a) 污染条件下离散度为 0.5 时地面降水的源汇项：云雨碰并（PRA）、云雨自动转化（PRC）、雨水的蒸发（PRE）、冰粒子的融化（MELT）；清洁和污染条件下（b）PRC、（c）PRA 和（d）MELT 整层累积随云滴谱离散度的变化。

Fig. 6 (a) Source and sink items of surface precipitation with dispersion of 0.5 under polluted condition: accretion rate of cloud droplets by rain (PRA), autoconversion rate of cloud droplets to rain (PRC); evaporation rate of rain (PRE); melting of ice particles (MELT); The variations of whole layer area average microphysical processes with spectral dispersion under clean and polluted conditions for (b) PRC, (c) PRA and (d) MELT

3.2.2 离散度增大促进降水的机理

如前所述，平均累计降水量随着云滴谱离散度的增大而增大。为了揭示背后的原因，图 6b、c、d 给出不同污染条件下雨滴三个主要源项（PRC、PRA 和 MELT）随云滴谱离散度的变化。其中云雨自动转化在清洁和污染的条件都随着离散度的增大而增大，清洁条件下增大的幅度为 2.5 kg/s，污染条件下增大的幅度为 0.8 kg/s；云雨碰并在清洁条件下先减小后增加，变化的幅度为 4.0 kg/s 左右，在污染条件下呈现减小的趋势，减小的幅度为 5.3 kg/s；而

冰粒子的融化则是随着离散度的增加而增加,在清洁和污染的条件下降增大的幅度分别为 16.0 kg/s 和 12.2 kg/s。融化增大的幅度大于云雨自动转化和云雨碰并。因此,随着云滴谱离散度的增大,降水增大的主要原因是冰粒子融化随着离散度的增大而增大。如前所述,与污染条件相比,清洁条件下离散度对地面降水增大的幅度较大,这是因为在清洁的条件下 PRC 和 MELT 随着云滴谱离散度增大的幅度比在污染条件下的大,其次 PRA 在污染条件下表现为减小的趋势。

由公式 3 可知,随着云滴谱离散度的增大,云雨自动转化率增大,意味着有更多的云滴被转化成雨滴,从而导致云滴的数浓度和质量浓度减小,雨滴的数浓度和质量浓度增大(图 7a-d)。云雨碰并过程随离散度的变化则比较复杂,这是因为该过程不仅取决于云滴的质量浓度,还取决于雨滴的质量浓度(Khairoutdinov and Kogan, 2000)。在清洁条件下,碰并先受到云滴的质量浓度的控制,随着离散度增大,云滴质量浓度减小,碰并过程减弱;随着离散度的继续增大,雨滴质量浓度增大,碰并过程增强,所以整体上云雨碰并过程呈现出先减弱后增强的趋势。污染条件下的雨滴质量浓度小于清洁状况,云雨碰并过程基本受到云滴质量浓度的控制;当云滴谱离散度增大时,云滴质量浓度减小,所以 PRA 呈现下降的趋势。

为了理解 MELT 随离散度的变化,需要对冰粒子微物理量及微物理过程进行深入研究。冰粒子的融化随着离散度的增大而增强,这是因为冰晶、雪晶和霰粒子的质量浓度均随着离散度的增大而增大(图 7e、f、g)。图 7 e-g 表明雪晶的质量浓度远比冰晶和霰的质量浓度大,因此雪是影响融化过程的主要因素。雪晶形成过程中主要的微物理过程包括雪碰并云水(PSACWS)、雪碰并雨水(PRACS)、冰晶向雪晶自动转化(PRCI)以及雪碰并冰晶(PRAI)这四个过程(图 8a)。随着离散度的增大,冰晶向雪晶的自动转化增强,产生了更多的初始雪晶(图 7f)。冰晶向雪晶自动转化的增强又与冰晶增多有关,而冰晶之所以增多是因为,随着离散度的增大,云到雨的自动转化率增大,初始雨水的含量增多,从而导致雪碰并雨水的过程增强;在该过程中,潜热释放,垂直速度随着离散度的增大而增强(图 8d),促进了云的发展,把更多的水汽抬升到更高的高度,从而增多冰晶,一些研究中有类似的研究结果(Chen et al., 2017 ; 侯团结等, 2008; Yin et al., 2017)。由于雪晶的质量浓度均随着离散度的增大而增大,雪晶碰并雨水的过程进一步增强,雪晶碰并云水和冰晶的强度也增大(图 8b、c)。因此,随着云滴谱离散度的增大,雪晶粒子的质量浓度增加,到达零度层以下时融化过程增强,从而导致了更强的地表降水。

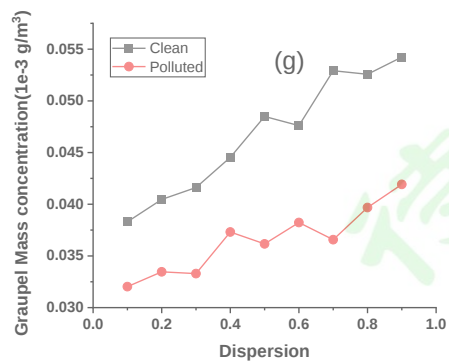
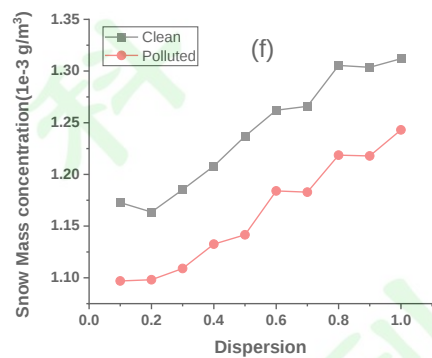
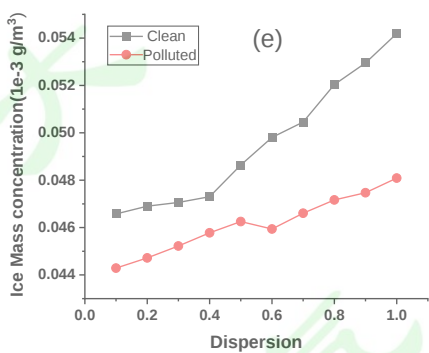
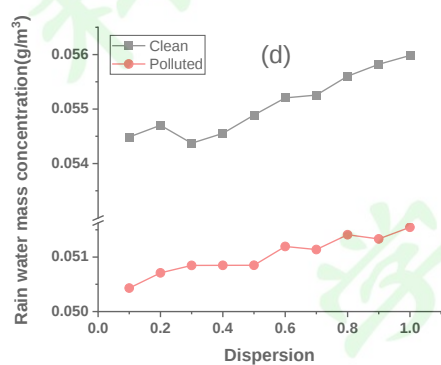
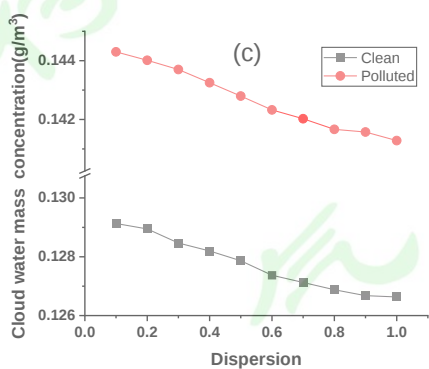
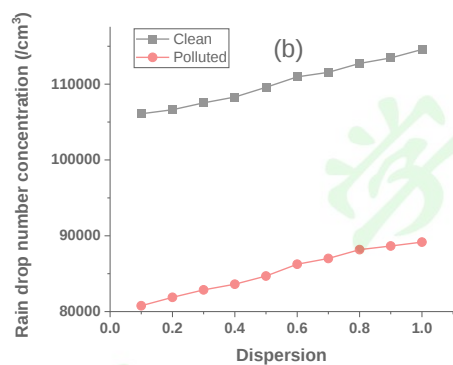
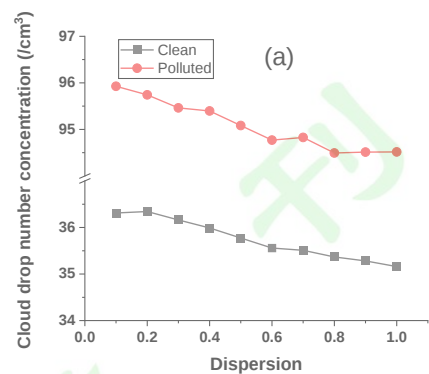


图 7. 在清洁和污染背景下，整层区域平均微物理量随云滴谱离散度的变化：(a、b) 分别为云、雨滴数浓度 ($/\text{cm}^3$)；(c、d) 分别为云、雨滴质量浓度 (g/m^3)；(e、f、g) 分别为冰晶、雪晶、霰的质量浓度 ($1\text{e-}3 \text{ g}/\text{m}^3$)。

Fig. 7 The variations of whole layer area average cloud microphysics with spectral dispersion, including (a, b) cloud and rain droplet number concentration ($/\text{cm}^3$), (c, d) cloud water and rain water mass concentration (g/m^3), (e, f, g) ice, snow and graupel mass concentration ($1\text{e-}3 \text{ g}/\text{m}^3$).

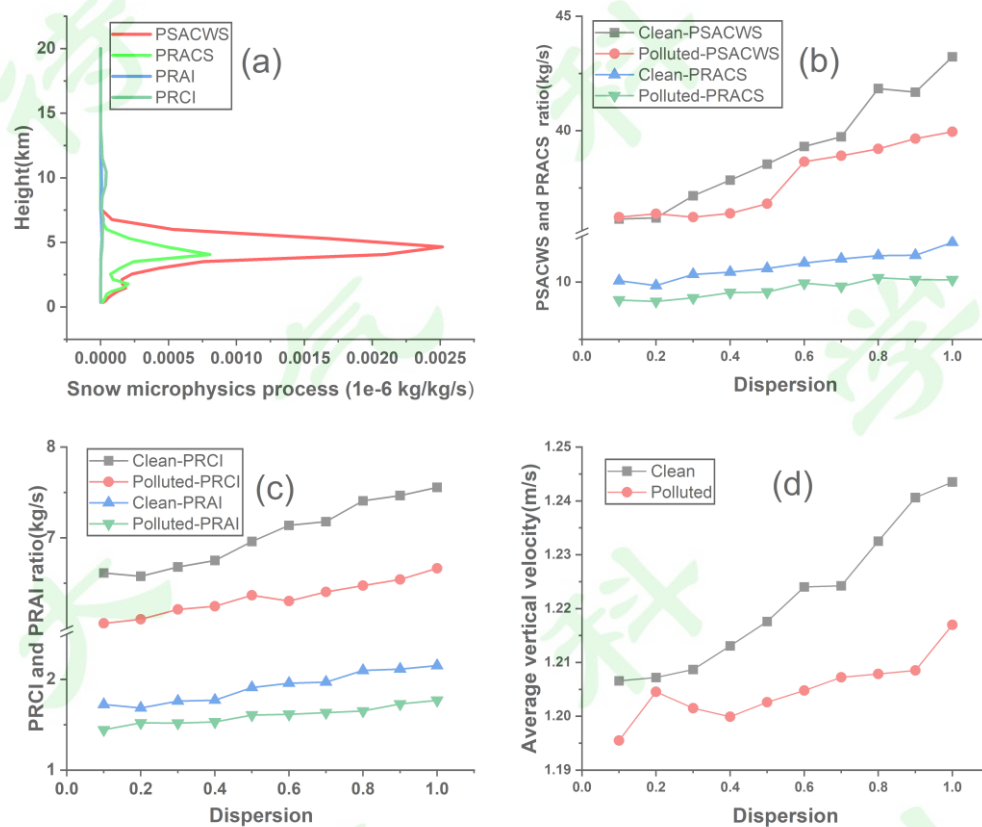


图 8. (a) 污染条件下离散度为 0.5 时，雪晶微物理过程速率的平均垂直廓线：雪晶碰并云水 (PSACWS)、雪晶碰并雨水 (PRACS)、冰晶向雪晶自转化 (PRCI)、雪晶碰并冰晶 (PRAI)。清洁和污染条件下雪晶主要微物理过程整层累积速率随离散度的变化：(b) 雪晶碰并云水 (PSACWS)、雪晶碰并雨水 (PRACS)；(c) 冰晶向雪晶自转化 (PRCI)；雪晶碰并冰晶 (PRAI)。(d) 平均垂直风速随离散度变化。

Fig. 8 (a) The average vertical profile of snow crystal microphysical process when the dispersion is 0.5 under polluted condition including: accretion of cloud water by snow (PSACWS), accretion of rain by snow (PRACS), autoconversion rate of ice crystal to snow crystal (PRCI), accretion of ice

by snow (PRAI). The variations of whole layer area average microphysical processes or wind speed with spectral dispersion under clean and polluted conditions for (b) accretion of cloud water by snow(PSACWS) and accretion of rain by snow(PRACS); (c) autoconversion rate of ice crystal to snow crystal (PRCI) and accretion of ice by snow (PRAI); and (d) Average vertical wind speed varies with dispersion.

4. 结论

本研究在 WRF-Chem 模式的 Morrison 微物理方案中, 采用包含云滴谱离散度的云雨自动转化方案, 研究清洁和污染背景下云微物理性质以及地面降水对云滴谱离散度的响应, 得出以下结论:

(1) 该个例中降水主要来源于云雨自动转化以及云雨碰并过程, 清洁条件下的地面累计降水大于污染条件下的结果。原因是, 清洁条件下的云滴数浓度比污染条件下的小, 半径大, 具有更大的云雨自动转化率和更强的云雨碰并过程。

(2) 虽然云雨自动转化和云雨碰并过程对降水的贡献更大, 但降水随着离散度增大而增强的原因主要是, 冰粒子的质量浓度随着离散度的增大而增大, 导致融化过程随着离散度的增大而增强。

(3) 降水随离散度增大而增强的幅度在清洁条件下更大。云雨自动转化和融化都随着离散度的增大而增大, 且清洁条件下增大的程度大于污染条件, 而云雨碰并在清洁条件下先减小后增加, 在污染条件下呈现减小的趋势, 因此在清洁条件下降水增加的程度大于污染条件下的结果。

云滴谱离散度在云和降水中具有重要的作用, 深入探讨云滴谱离散度和云的微物理之间的关系将有助于我们理解气溶胶-云-降水相互作用。本文的研究结果对于在不同的气溶胶背景下, 暖云和冷云降水相互作用模拟降水均有一定的参考价值。本研究目前将云滴谱离散度设置为不同的值, 但实际上云滴谱离散度会受到云滴数浓度、云水含量等的影响而不断变化 (Martins and Dias, 2009; Tas et al., 2012; Wang et al., 2020; Wang et al., 2021)。此外, 云滴谱离散度与云微物理量的正负关系一直存在争议 (Lu et al., 2012; Ma et al., 2010; Peng and Lohmann, 2003)。因此未来有必要在 WRF-Chem 中加入离散度的参数化方案, 根据微物理量诊断离散度, 更好地描述离散度对云和降水模拟的影响。

参考文献

- Ackermann I J, Hass H, Memmesheimer M, et al. 1998. Modal aerosol dynamics model for Europe: Development and first applications [J]. *Atmospheric environment*, 32(17): 2981-2999. doi: 10.1016/S1352-2310(98)00006-5.
- Barnston A G.1992.Correspondence among the correlation, RMSE, and Heidke forecast verification measures; refinement of the Heidke score [J]. *Weather and Forecasting*, 7(4): 699-709.doi: 10.1175/1520-0434(1992)0072.0.CO;2.
- Chen Q, Koren I, Altaratz O, et al. 2017. How do changes in warm-phase microphysics affect deep convective clouds? [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(15): 9585-9598. doi: 10.5194/acp-17-9585-2017.
- Chen J, Liu Y, Zhang M, et al. 2016. New understanding and quantification of the regime dependence of aerosol-cloud interaction for studying aerosol indirect effects [J]. *Geophysical Research Letters*, 43(4): 1780-1787.doi: 10.1002/2016GL067683.
- Chou M, Suarez M J 1994. An Efficient Thermal Infrared Radiation Parameterization For Use In General Circulation Models [J].
- 邓玮, 孙继明, 雷恒池.2019. 三参数云微物理方案中气溶胶谱函数对云滴谱影响的数值模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 024(6): 693-710. Deng Wei, Sun Jiming, Lei Hengchi. 2019. Numerical simulation research on the effects of the size distribution of aerosols on the droplet spectrum with a newly developed triple-Moment bulk scheme [J]. *Climatic and Environmental Research(in Chinese)*, 024(6): 693-710.doi: CNKI:SUN:QHYH.0.2019-06-003.
- Dessler A 2010. A Determination of the Cloud Feedback from Climate Variations over the Past Decade [J]. *Science*, 330(6010): 1523-1527. doi: 10.1126/science.1192546.
- Grell G A 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations [J]. *Monthly Weather Review*, 121(3): 764-787. doi: 10.1175/1520-0493(1993)1212.0.CO;2.
- Hong S-Y, Noh Y, Dudhia J 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Monthly Weather Review*. 134(9): 2318-2341, doi: 10.1175/MWR3199.1.
- 侯团结, 牛生杰, 雷恒池, 等. 2008. 长春地区对流云起电过程的数值模拟 [J]. *大气科学学报*, 31(2): 221-227. Hou Tuanjie, Niu Shengjie, Lei Hengchi, et al. 2008. A numerical simulation of electrification inside convective clouds in Changchun [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences(in Chinese)*, 31(2): 221-227. doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2008.02.011.
- IPCC. 2021.Climate change: the physical science basis [M].Cambridge: Cambridge University Press, 2021, In Press.
- Jia X, Quan J, Zheng Z, et al. 2018. Impacts of anthropogenic aerosols on fog in North China Plain [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(1): 252-265. doi: 10.1029/2018JD029437.
- Khairoutdinov M, Kogan Y 2000. A New Cloud Physics Parameterization in a Large-Eddy Simulation Model of Marine Stratocumulus [J]. *Monthly Weather Review*. 128(1): 229-243, doi: 10.1175/1520-0493(2000)1282.0.CO;2.
- Li, Zhanqing, Rosenfeld, et al. 2017. Aerosols and their Impact on Radiation, Clouds, Precipitation & Severe Weather Events. *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. doi:10.1093/acrefore/9780199389414.013.126
- Li G, Wang Y, Zhang R 2008. Implementation of a two-moment bulk microphysics scheme to the WRF model to investigate aerosol-cloud interaction [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(D15). doi: 10.1029/2007JD009361.

- 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]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , 124(23): 13026-13054. doi: 10.1029/2019JD030758.
- 刘圣楠, 崔晓鹏. 2018. "碧利斯"(2006)暴雨过程降水强度和降水效率分析 [J]. *大气科学* , 42(1): 195-211. Liu Shengnan, Cui XiaoPeng. 2018. Diagnostic analysis of rate and efficiency of torrential rainfall associated with Bilis (2006) [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese)*, 42(1): 195-211. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1704.17148.
- Liu Y 2005. Size truncation effect, threshold behavior, and a new type of autoconversion parameterization [J]. *Geophysical Research Letters* , 32(11), doi: 10.1029/2005GL022636.
- Liu Y, Daum P H 2002. Anthropogenic aerosols: Indirect warming effect from dispersion forcing [J]. *Nature* , 419(6907): 580-581. doi: 10.1038/419580a.
- Liu Y, Daum P H, Guo H, et al. 2008. Dispersion bias, dispersion effect, and the aerosol-cloud conundrum [J]. *Environmental Research Letters* , 3(4): 045021. doi: 10.1088/1748-9326/3/4/045021.
- Liu Y, Daum P H, McGraw R, et al. 2006a. Parameterization of the autoconversion process. Part II: Generalization of Sundqvist-type parameterizations [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences* , 63(3): 1103-1109. doi: 10.1175/jas3675.1.
- Liu Y, Daum P H, Yum S S 2006b. Analytical expression for the relative dispersion of the cloud droplet size distribution [J]. *Geophysical Research Letters* , 33(2). doi: 10.1029/2005GL024052.
- Liu Z, Wang M, Rosenfeld D, et al. 2020. Evaluation of Cloud and Precipitation Response to Aerosols in WRF - Chem With Satellite Observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , 125(18): e2020JD033108. doi: 10.1029/2020JD033108.
- Lu C, Liu Y, Niu S, et al. 2012. Observed impacts of vertical velocity on cloud microphysics and implications for aerosol indirect effects [J]. *Geophysical Research Letters*, 39(21).doi: 10.1029/2012GL053599.
- Lu C, Liu Y, Yum S S, et al. 2020. Reconciling contrasting relationships between relative dispersion and volume-mean radius of cloud droplet size distributions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(9): e2019JD031868. doi: 10.1029/2019JD031868.
- Ma J, Chen Y, Wang W, et al. 2010. Strong air pollution causes widespread haze-clouds over China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D18).doi: 10.1029/2009JD013065.
- Martins J A, Dias M S 2009. The impact of smoke from forest fires on the spectral dispersion of cloud droplet size distributions in the Amazonian region [J]. *Environmental Research Letters* , 4(1): 015002. doi: 10.1088/1748-9326/4/1/015002.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated - k model for the longwave [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , 102(D14): 16663-16682. doi: 10.1029/97jd00237.
- Morrison H, Grabowski W W 2008. Modeling Supersaturation and Subgrid-Scale Mixing with Two-Moment Bulk Warm Microphysics [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 65(3): 792-812, doi: 10.1175/2007JAS2374.1.
- Paulson C A 1970. The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer [J]. *J.appl.meteorol* , 9(6): 857-861. doi: 10.1175/1520-0450(1970)0092.0.CO;2.
- Peng Y, Lohmann U 2003. Sensitivity study of the spectral dispersion of the cloud droplet size distribution on the indirect aerosol effect [J]. *Geophysical Research Letters* , 30(10). doi:

- 10.1029/2003GL017192.
- Rosenfeld D 1999. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall [J]. *Geophysical Research Letters* , 26(20) 3105-3108. doi: 10.1029/1999GL006066.
- Rotstayn L D, Liu Y 2002. Sensitivity of the First Indirect Aerosol Effect to an Increase of Cloud Droplet Spectral Dispersion with Droplet Number Concentration [J]. *Journal of Climate* , 16(21): 3476-3481. doi: 10.1080/02786820701408517.
- 石睿, 王体健, 李树, 等. 2015. 东亚夏季气溶胶—云—降水分布特征及其相互影响的资料分析 [J]. *大气科学* , 39(1): 12-22. Shi Rui, Wang Tijian, Li Shu, et al. 2015. The spatial and temporal characteristics of aerosol—cloud—precipitation interactions during summer in East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese)*, 39(1): 12-22. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1404.13276.
- Schell B, Ackermann I J, Hass H, et al. 2001. Modeling the formation of secondary organic aerosol within a comprehensive air quality model system [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , 106(D22): 28275-28293. doi: 10.1029/2001JD000384.
- Stockwell W R, Middleton P, Chang J S, et al. 1990. The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , 95(D10): 16343-16367. doi: 10.1029/JD095iD10p16343.
- Storer R L, Van Den Heever S C, Stephens G L 2010. Modeling aerosol impacts on convective storms in different environments [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences* , 67(12): 3904-3915. doi: 10.1175/2010JAS3363.1.
- 苏艳, 刘端阳, 彭华青, 等. 2016. 无锡梅雨期湿沉降综合分析 [J]. *气象科学* , 36(4): 547-555. Su Yan, Liu Duanyang, Peng Huaqing, et al. 2016. Comprehensive analysis of wet deposition during the Meiyu period in Wuxi [J]. *Journal of the Meteorological Sciences(in Chinese)*, 36(4): 547-555. doi: 10.3969/2016jms.0010.
- 苏传程, 毛文书, 师春香, 等. 2016. 多种降水融合产品对“苏迪罗”台风的监测效果对比 [J]. *成都信息工程大学学报*, 2016, 31(6): 614-621. Su Chuancheng, Mao Wenshu, Shi Chunxiang, et al. 2016. Comparison of Monitoring Effects of Various Precipitation Fusion Products on Typhoon soudelor [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology(in Chinese)*, 31(6): 614-621. doi: 10.3969/j.issn.1671-1742.2016.06.011.
- 宿兴涛, 许丽人, 魏强, 等. 2016. 东亚地区沙尘气溶胶对降水的影响研究 [J]. *高原气象* , 35(1): 213-221. Su Xingtao, Xu Liren, Wei Qiang, et al. 2016. Study of impacts of dust aerosol on precipitation over East Asia [J]. *Plateau Meteorology(in Chinese)*, 35(1): 213-221. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00091.
- Tas E, Koren I, Altaratz O 2012. On the sensitivity of droplet size relative dispersion to warm cumulus cloud evolution [J]. *Geophysical Research Letters* , 39(13). doi: 10.1029/2012GL052157.
- Wang C 2005. A modeling study of the response of tropical deep convection to the increase of cloud condensation nuclei concentration: 1. Dynamics and microphysics [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* , 110(D21). doi: 10.1029/2004JD005720.
- Wang M, Peng Y, Liu Y, et al. 2020. Understanding Cloud Droplet Spectral Dispersion Effect Using Empirical and Semi - Analytical Parameterizations in NCAR CAM5.3 [J]. *Earth and Space Science* , 7(8): e2020EA001276. doi: 10.1029/2020EA001276.
- 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]. *Atmospheric Chemistry and Physics* , 11(23): 12421-12436. doi: 10.5194/acp-11-12421-2011.

- Wang Y, Zhao C, McFarquhar G M, et al. 2021. Dispersion of Droplet Size Distributions in Supercooled Non-precipitating Stratocumulus from Aircraft Observations Obtained during the Southern Ocean Cloud Radiation Aerosol Transport Experimental Study [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(6): e2020JD033720. doi: 10.1029/2020JD033720.
- 吴启树, 韩美, 刘铭, 等. 2017. 基于评分最优化的模式降水预报订正算法对比[J]. *应用气象学报*, 28(3): 306-317. doi: 10.11898/1001-7313.20170305.
- 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]. *Atmospheric Research*, 221: 27-33. doi: 10.1016/j.atmosres.2019.01.027.
- 俞琳飞, 张永强, 张佳华, 等. 2020. 卫星降水产品在太行山区的适用性初步评估 [J]. *高原气象*, 2020, 39(4): 819-829. Yu Hongfei, Zhang Yongqiang, Zhang Jiahua, et al. 2020. Preliminarily Evaluate the Applicability of Satellite Precipitation Products over the Taihang Mountains [J]. *Plateau Meteorology*, 39(4): 819-829. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00007.
- 肖辉, 银燕. 2011. 污染气溶胶对山西一次降水过程影响的数值模拟 [J]. *大气科学*, 35(2): 235-246. Xiao Hui, Yin Yan. 2011. A numerical study of polluted aerosol effects on precipitation in Shanxi province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35(2): 235-246. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.04.
- Xie X, Liu X 2011. Effects of spectral dispersion on clouds and precipitation in mesoscale convective systems [J]. *Journal of Geophysical Research*, 116(D6), doi: 10.1029/2010JD014598.
- Xie X, Liu X 2012. Analytical three-moment autoconversion parameterization based on generalized gamma distribution [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117(D17). doi: 10.1029/2008JD011633.
- 解小宁, 刘晓东, 王昭生. 2015. 云滴谱离散度对气溶胶间接效应影响的研究进展 [J]. *地球环境学报*, 6(2): 127-134. Xie Xiaoning, Liu Xiaodong, Wang Zhaosheng. 2015. Review of influence of cloud droplet spectral dispersion on aerosol indirect effects [J]. *Journal of Earth Environment (in Chinese)*, 6(2): 127-134. doi: 10.7515/JEE201502008.
- 解小宁, 王昭生, 王红丽, 等. 2016. 云微物理特性及云滴有效半径参数化: 一次降水层状云的飞机观测资料结果 [J]. *地球环境学报*, 7(1): 12-18. Xie Xiaoning, Wang Zhaosheng, Wang Hongli, et al. 2016. Cloud microphysical properties and parameterization of cloud droplet effective radius from aircraft measurements: aircraft observational results from a stratiform precipitation cloud [J]. *Journal of Earth Environment (in Chinese)*, 7(1): 12-18. doi: 10.7515/JEE201601002.
- Xie X, Zhang H, Liu X, et al. 2017. Sensitivity study of cloud parameterizations with relative dispersion in CAM5.1: impacts on aerosol indirect effects [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(9): 5877-5892. doi: 10.5194/acp-17-5877-2017.
- Xie, X, Zhang, H, Liu, X, et al. 2018. Role of microphysical parameterizations with droplet relative dispersion in IAP AGCM 4.1 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 35(BNL-114208-2017-JA). doi: 10.1007/s00376-017-7083-5.
- Xu X, Lu C, Liu Y, et al. 2020. Effects of cloud liquid - phase microphysical processes in mixed - phase cumuli over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(19): e2020JD033371. doi: 10.1029/2020JD033371.
- 杨宗甄, 陈宝君, 银燕. 2012. 三江源地区对流云吸湿性催化的数值模拟 [J]. *气象科学*, 32(1): 9-17. Yang Zongzhen, Chen Baojun, Yin Yan. 2012. Numerical simulation of hygroscopic seeding of convective clouds in the origin area of Three Rivers [J]. *Journal of the Meteorological*

- Sciences(in Chinese), 32(1):9-17. doi: 10.3969/2012jms.0026.
- Yin J F, Wang D H, Liang Z M, et al. 2017. Numerical study of the role of microphysical latent heating and surface heat fluxes in a severe precipitation event in the warm sector over southern China [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* , 54(1): 1-14. doi:10.1007/s13143-017-0061-0.
- 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(6): 605-614. Zhou Guangqiang, Zhao Chunsheng, Qin Yu. 2005. Influence of cloud droplets spectral uncertainty on the mesoscale precipitation [J] . *Journal of Tropical Meteorology(in Chinese)*, 21(6): 605-614. doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2005.06.006.
- 朱磊, 陆春松, 高思楠, 等. 2020. 海洋层积云中的云滴谱宽度及其影响因子 [J]. *大气科学* , 44(3), 575-590. Zhu Lei, Lu Chunsong, Gao Sinan, et al. 2020. Spectral Width of Cloud Droplet Spectrum and Its Impact Factors in Marine Stratocumulus [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 44(3): 575–590. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1905.19115.
- Zhao C, Tie X, Brasseur G, et al. 2006a. Aircraft measurements of cloud droplet spectral dispersion and implications for indirect aerosol radiative forcing [J]. *Geophysical Research Letters* , 33(16). doi:10.1029/2006GL026653.
- Zhao C, Tie X, Lin Y 2006b. A possible positive feedback of reduction of precipitation and increase in aerosols over eastern central China [J]. *Geophysical Research Letters* , 33(11). doi: 10.1029/2006GL025959.
- Zhao C, Zhao L, Dong X. 2019. 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 C, Yang Y, Fan H, et al. 2020. Aerosol characteristics and impacts on weather and climate over the Tibetan Plateau[J]. *National Science Review*, 7(3): 492-495.doi: 10.1093/nsr/nwz184.
- Zhao C, Lin Y, Wu F, et al.2018. Enlarging rainfall area of tropical cyclones by atmospheric aerosols[J]. *Geophysical Research Letters*, 45(16): 8604-8611. doi: 10.1029/2018GL079427.
- Zhou S, Yang J, Wang W C, et al. 2020.An observational study of the effects of aerosols on diurnal variation of heavy rainfall and associated clouds over Beijing–Tianjin–Hebei[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(9): 5211-5229. doi: 10.5194/acp-20-5211-2020.