

海洋层积云中的云滴谱宽度及其影响因子

朱磊¹, 陆春松¹, 高思楠¹, Seong Soo Yum²

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 Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

摘要 云滴谱宽度对模式中云的光学厚度的参数化、气溶胶间接效应的评估以及降水形成过程的研究至关重要。本文利用美国 POST (Physics of Stratocumulus Top) 项目 2008 年 7 月 19 日的飞机观测资料, 分析了微物理量和云滴谱的垂直分布及微物理过程。结果表明, 该云系云滴谱宽度在云底附近较大, 这是由低层核化过程导致的; 中层凝结增长过程使得云滴谱宽度随高度增加逐渐减小; 云顶附近夹卷混合过程导致云滴谱宽度增大。绝热云中垂直速度的增大会促进云凝结核的活化使云滴数浓度增大, 促进凝结增长使云滴尺度增大、云滴谱宽度减小, 云滴谱宽度与云滴数浓度、云滴尺度呈现负相关关系; 云洞中受夹卷混合过程影响, 垂直速度减小, 云滴蒸发, 云滴数浓度和云滴尺度减小、云滴谱宽度增大, 且该效应随绝热程度减小而增强。建议云滴谱宽度的参数化将垂直速度、云滴数浓度、云滴尺度和绝热程度等考虑在内。

关键词 云滴谱宽度 海洋层积云 微物理 飞机观测

文章编号

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1905.19115

Spectral Width of Cloud Droplet Spectra and its Impact Factors in Marine Stratocumulus

ZHU Lei¹, LU Chunsong¹, GAO Sinan¹, and Seong Soo Yum²

1Key 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

2Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

Abstract The spectral width of cloud droplet spectra is crucial to the parameterization of the cloud optical depth, the assessment of the indirect aerosol effect and the formation of precipitation in numerical simulation. Based on

收稿日期 2019-01-24; **网络预出版日期**

作者简介 朱磊, 男, 1995 年 10 月出生, 硕士研究生, 主要从事云降水物理方向研究。Email: zl2018@nuist.edu.cn

通讯作者 陆春松, 男, 1982 年 4 月出生, 教授, 博导, 主要研究云雾物理及其参数化。Email: luchunsong110@163.com

资助项目 江苏省自然科学基金杰出青年基金 BK20160041, 国家重点研发计划 2017YFA0604000, 国家自然科学基金优秀青年基金 41822504, 青蓝工程 R2018Q05, 江苏省六大人才高峰 2015-JY-011, 江苏省 333 工程 BRA2016424

Funded by Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant BK20160041), National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFA0604000), National Natural Science Foundation of China-- Excellent Young Scientists Fund (Grant 41822504), Qinglan Project of Jiangsu Province, China (Grant R2018Q05), Six Talent Peak Project in Jiangsu, China (Grant 2015-JY-011), 333 High-level Talents Training Project in Jiangsu, China (Grant BRA2016424)

the aircraft observations of cloud microphysics in stratocumulus on July 19, 2008 during the Physics of Stratocumulus Top (POST) field campaign, the vertical distribution of microphysical properties and cloud droplet spectra are analyzed, as well as the cloud microphysical processes. The results show that the spectral width of cloud droplet spectra is basically larger near cloud base which is caused by aerosol nucleation. The spectral width decreases as height increases in the middle layer of the cloud, which is caused by condensation growth. The increase of the spectral width near the cloud top is caused by the entrainment-mixing processes. The increase of vertical velocity in the adiabatic cloud increases the cloud droplet number concentration by promoting the activation of cloud condensation nuclei (CCN), and increases the cloud droplet size and leads to the decrease of the spectral width by promoting the condensation growth, and ultimately leads to the negative correlation between the spectral width and the cloud droplet number concentration as well as the cloud droplet size. The decrease of vertical velocity caused by entrainment-mixing processes in cloud holes decreases the cloud droplet number concentration and the cloud droplet size and increases the spectral width by promoting the evaporation of cloud droplets, which will be enhanced by the decrease of adiabatic fraction. Based on these observations, it is recommended that the parameterization of the spectral width of cloud droplet spectra takes into account vertical velocity, cloud droplet number concentration, cloud droplet size, adiabatic fraction, etc.

Keywords Spectral width of cloud droplet spectra, Marine stratocumulus, Microphysics, Aircraft observation

1 引言

云在地气系统的能量收支和气候变化过程中起着重要作用。为此，学者们对云中的宏微物理过程进行了深入研究（郭学良等，2013）。比如，Li et al. (2004) 结合卫星资料和地面观测资料揭示了中国地区高、中、低云总云量和分云量的空间分布和季节变化；飞机观测可以直接观测到高分辨率的云的微物理量以及时空变化（段婧和毛节泰，2008；雷恒池等，2008；解小宁等，2016），利用卫星探测资料可以反演出大范围云微物理量的垂直结构（胡朝霞等，2007；戴进等，2011；张华等，2015；刘屹岷等，2018；岳治国等，2018），通过模式和观测资料的结合对不同微物理方案的研究能揭示云中的微物理过程，逐渐提高模拟能力（赵春生和石坂隆，2004；杨洁帆等，2010；陈宝君等，2016；唐洁等，2018）。但是，云系结构及降水形成的一些关键物理过程和形成机理尚不清楚，例如暖云降水的形成一直以来都是未解之谜（周秀骥和顾震潮，1963；Lu et al., 2018）、云的有效半径对气溶胶浓度的响应存在不确定性（Zhao et al., 2019）等，给相关微物理过程的参数化带来了很大的困难。

暖云降水形成过程与云滴谱宽度紧密相关。在传统绝热凝结增长理论模型下，云滴谱宽度应该十分狭窄（Rogers and Yau, 1996），但在观测中却得到了相对较宽的云滴谱（Martin et al., 1994；Hudson and Yum, 1997），学者们普遍认为这是暖云降水形成的重要原因：云滴谱增宽促进了云中的碰并过程，进而形成降水，于是云滴谱如何增宽成为了学者们研究的焦点。Hudson and Yum (1997) 利用绝热凝结增长模式证明绝热云的云滴谱宽度与云凝结核（cloud condensation nuclei, CCN）的浓度以及 CCN 的谱分布有关；Yum and Hudson (2005) 还发现云的过饱和度以及垂直速度对绝热云中云滴谱宽度具有重要作用，云内较低的过饱和度和较小的垂直速度，都将导致云滴谱的增宽。绝热云的模式结果虽然解释了一定程度的云滴谱增宽，

但是仍然没有完全解决云滴谱如何增宽这个科学问题。一些学者认为湍流起伏（肖辉等，1988；雷恒池等，2008）和夹卷混合过程（Lasher-Trapp et al., 2005）也可能导致云滴谱增宽，但是还需要在观测、实验室研究和高分辨率数值模拟中进行验证（Lu et al., 2018）。

在研究云滴谱增宽时，云滴谱宽度可以用云滴谱标准差（ σ_c ）和离散度（云滴谱标准差和云滴平均半径（ r_m ）的比值， $d=\sigma_c/r_m$ ）来表示，其中离散度作为云滴谱的相对宽度对云微物理参数化方案的研究非常重要（Liu et al., 2017），Deng et al.（2018）采用包含了与云滴谱宽度相关的谱型参数（ α ）的三参数云滴谱方案，对暖云降水的形成和发展的模拟得到了更好的效果。在模式研究中，离散度会影响有效半径的参数化（Liu and Daum, 2000；解小宁等，2016），从而影响云的光学厚度并通过改变云的反照率来影响云的辐射特性（汪宏七和赵高祥，1994；石广玉等，2008）。云滴谱宽度对气候模式中准确估算气溶胶间接效应也具有重要作用，Liu and Daum（2002）提出了离散度效应，即离散度的变化会改变云滴有效半径从而影响气溶胶的间接效应，许多学者利用气候模式对此进行了研究，并得到了一致的结论（Rotstayn and Liu, 2003；Peng and Lohmann, 2003）。此外，离散度与云滴数浓度的关系还会影响云水自动转化率，并对气溶胶引起的地表降水的形成过程产生影响（Xie et al., 2013）。

由此可见，离散度在模式研究中具有重要作用，但是目前的离散度参数化方案有很大的不确定性，比如有的研究指出离散度与气溶胶数浓度或者云滴数浓度之间呈正相关关系（Martin et al., 1994；Liu and Daum, 2002；Rotstayn and Liu, 2003, 2009；Yum and Hudson, 2005；Liu et al., 2008）；有的则为负相关关系（Martins and Dias, 2009；Ma et al., 2010；Wang et al., 2019）；Zhao et al.（2006）则发现随着气溶胶数浓度或者云滴数浓度的增大，离散度会逐渐收敛，变化范围减小，没有明显的正相关或者负相关关系。导致参数化方案不确定的主要原因是对影响离散度的因子理解不够，且以往的研究往往局限于 1-2 个影响因子（Liu et al., 2006, 2008）。因此，仍然需要基于实测资料进行深入分析。

为了弥补该不足，本文利用高分辨率的飞机观测资料，分析微物理量和云滴谱的垂直分布特征，重点研究云滴谱宽度垂直分布，综合考虑不同影响因子的作用，为改进模式中云滴谱宽度的参数化方案奠定基础。

2 观测资料和研究方法

2.1 资料来源

本文研究所用资料来自美国 POST（Physics of Stratocumulus Top）项目，POST 项目现场测量使用了跨学科遥控飞机研究中心（CIRPAS）的 Twin Otter 研究机，从 2008 年 7 月 14 日至 8 月 15 日在加利福尼亚州蒙特雷进行了大约 20 个架次的飞行。为了减小降水对研究结果的影响，本文选取 7 月 19 日这一架次进行分析，该架次所探测层积云为非降水云（云成像仪（Cloud Imaging Probe, CIP）所测毛毛雨平均液水含量小于 0.005 g m^{-3} ），图 1 为该个例的飞机飞行轨迹。为了研究微物理量的垂直分布特征，本文选取了该个例中的 9 次垂直穿云过程进行分析，选取标准是每次穿云飞行都包含了云底和云顶的测量。

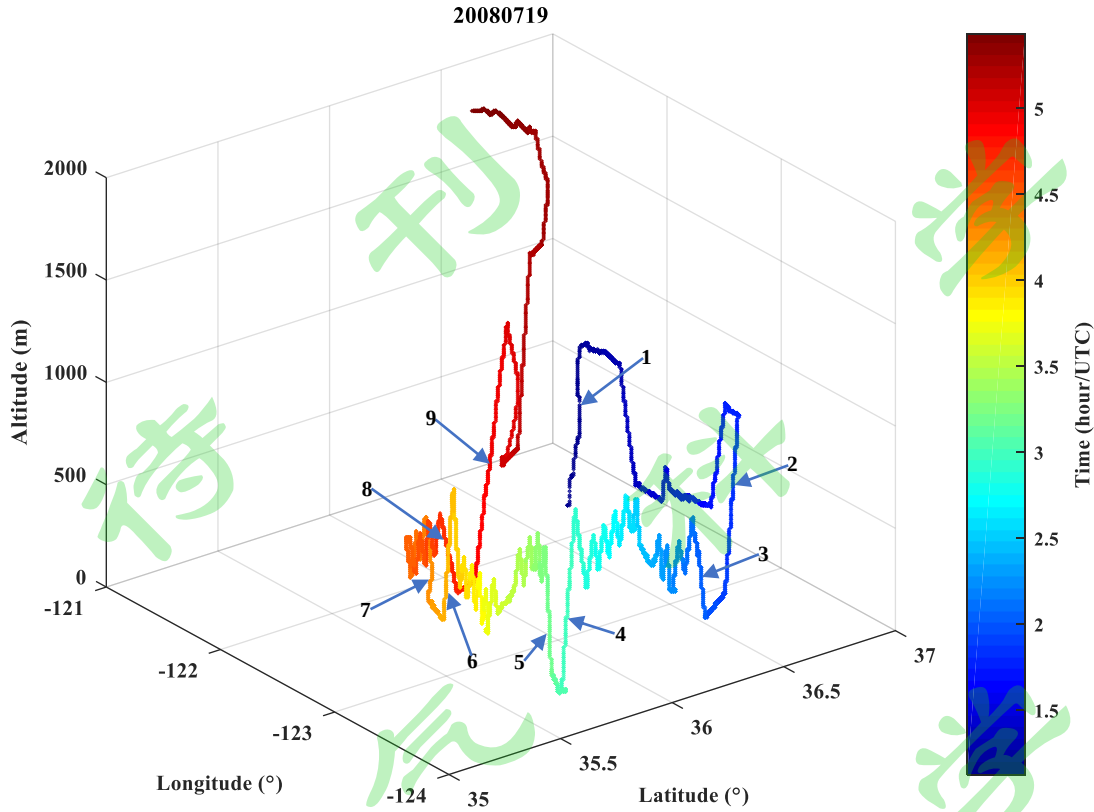


图 1 2008 年 7 月 19 日飞行轨迹

Figure 1 The flight path of the aircraft on 19 July 2008.

云滴谱资料是由美国 DMT (Droplet Measurement Technologies) 公司生产的云、气溶胶和降水粒子谱仪 (CAPS) 中的 CAS (cloud aerosol spectrometer) 探头获得, 频率为 10 Hz。CAS 探头的测量范围为半径 0.29~25.45 μm , 并将之分为 20 档, 半径大于 1 μm 的部分计算云滴的微物理量, 半径小于 1 μm 的部分计算气溶胶的数浓度。由于 CAS 的下限为 0.29 μm , 不足以涵盖所有的气溶胶粒径段, 但本文只使用气溶胶数浓度做定性研究, 不做定量分析, 因此对研究结果没有影响。垂直速度资料是由加利福尼亚大学欧文分校(UCI)提供的五孔阵风探测器获得, 频率为 40 Hz。另外, 还采用了美国 Gerber 科学有限公司 (Gerber scientific Inc., GSI) 的粒子体积测量仪 (fast particulate volume monitor, PVM) 所测的含水量进行质量控制, 频率为 1000 Hz。

2.2 研究方法

数浓度 (N)、云中含水量 (L)、平均半径 (r_m)、体积平均半径 (r_v)、标准差 (σ_c)、离散度 (d) 等微物理量由云滴谱资料计算得到, 计算公式如下:

$$N = \sum_{i=1}^k n_i, \quad (1)$$

$$L = \sum_{i=1}^k \frac{4}{3} \pi r_i^3 \rho_w n_i, \quad (2)$$

$$r_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k r_i n_i, \quad (3)$$

$$r_v = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k r_i^3 n_i \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

$$\sigma_c = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (r_i - r_m)^2 n_i \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

$$d = \frac{\sigma_c}{r_m}, \quad (6)$$

式中： n_i 为每档粒子数浓度（单位： cm^{-3} ）； k 为档的个数； N 为总数浓度（单位： cm^{-3} ）； r_i 为每档粒子半径（单位： μm ）； r_m 为平均半径（单位： μm ）； r_v 为体积平均半径（单位： μm ）； σ_c 为标准差（单位： μm ）； L 为含水量（单位： g m^{-3} ）； ρ_w 为液水密度（单位： g m^{-3} ）； d 为离散度（无量纲）；下标 i 表示数据的第 i 档。

挑云标准为云滴数浓度 $N_c > 10 \text{ cm}^{-3}$ 和含水量 $L > 0.001 \text{ g m}^{-3}$ (Lu et al., 2011)，云底高度的确定参考了 Gerber et al. (2008) 的方法：以低层较大的含水量作为绝热含水量，根据绝热含水量随高度的变化曲线找出绝热含水量为 0 时对应的高度即为云底高度。根据飞机飞行路线将 9 次垂直穿云过程时间段挑出，并分析这些时间段内云滴谱宽度等微物理量和云滴谱随高度的变化特征，以及云滴谱宽度和其他微物理量之间的相关关系。使用 PVM 高分辨率资料进行质量控制时发现第 1、2 次垂直穿云过程的 CAS 资料计算所得含水量和 PVM 探头所测含水量差别很大，判断至少有一个仪器出现故障，因此不对第 1、2 次垂直穿云过程进行分析。

3 结果和分析

3.1 云微物理量的基本特征

云的微物理量能够在一定程度上反映云内的基本特征，表 1 给出了不同资料来源的层积云（Sc）微物理特征的对比。对于 POST 资料，考虑到层积云的云底高度不一致，对每次垂直穿云过程分别确定云底高度。云滴数浓度在不同穿云过程中差别较大，其余微物理量在不同穿云过程中数值相当。对比不同来源的层积云微物理特征可以发现（表 1），POST 所探测的海洋层积云云底、云顶高度、数浓度、含水量等微物理量与 Lu et al. (2007) 分析的海洋层积云数值相当，但是和大陆层积云（张正国等，2018）相比，POST 所测海洋层积云云底、云顶高度较低，数浓度和含水量也较小，这些区别和 Miles et al. (2000) 总结的海洋性层云和大陆性层云之间的区别类似。综合来看，本文分析的 POST 资料所探测的海洋层积云能够代表一般性海洋层积云的特征。

表 1 不同来源的层积云微物理量的平均值（括号内为相应变量的标准差）

Table 1 Average value of microphysical properties of stratocumulus from different sources. The figures in the parentheses are the standard deviations of the corresponding properties.

来源	穿云序号	云底~云顶 (m)	云滴数浓度 (cm^{-3})	含水量 (g m^{-3})	平均半径 (μm)	离散度	标准差 (μm)
POST 20080719 (海洋 Sc)	3	226~478	249.58(91.27)	0.22(0.11)	5.27(0.97)	0.31(0.10)	1.55(0.35)
	4	254~478	253.46(107.11)	0.24(0.16)	5.24(1.01)	0.35(0.12)	1.74(0.46)
	5	215~477	280.00(97.91)	0.25(0.15)	5.29(1.22)	0.30(0.12)	1.47(0.45)
	6	197~457	316.61(108.90)	0.29(0.17)	5.43(1.18)	0.29(0.12)	1.47(0.50)
	7	134~409	274.79(121.51)	0.26(0.17)	5.19(1.23)	0.32(0.15)	1.49(0.50)
	8	179~433	286.72(107.92)	0.25(0.17)	5.08(1.31)	0.30(0.12)	1.39(0.34)
	9	152~417	305.97(122.23)	0.24(0.16)	4.80(1.16)	0.33(0.14)	1.48(0.51)
	Cloud 2	315~555	228(57)	0.09(0.05)		0.35(0.04)	1.56(0.22)
	Cloud 5A	222~667	401(90)	0.36(0.08)		0.25(0.02)	1.69(0.21)
Lu et al., 2007 (海洋 Sc)	Cloud 8	193~570	118(32)	0.37(0.08)		0.28(0.05)	1.91(0.39)
	Cloud 10	300~685	43(10)	0.09(0.02)		0.40(0.03)	2.85(0.43)
	Cloud 13	101~450	136(48)	0.13(0.08)		0.33(0.05)	2.21(0.31)
	Cloud 14A	67~364	183(31)	0.37(0.03)		0.33(0.02)	2.14(0.26)
	Cloud 16	100~366	479(24)	0.30(0.04)		0.30(0.02)	1.91(0.27)
张正国等, 2018 (广西 Sc)		600~2500	624.4	1.06	5.56		
Miles et al., 2000	海洋云		74(45)	0.18(0.14)	7.1(1.7)		5.8(2.0)
	大陆云		288(159)	0.19(0.21)	4.1(1.9)		3.1(1.2)

3.2 云滴谱宽度垂直分布

通过对 7 次垂直穿云过程进行分析，发现离散度随高度整体而言是递减的，但同时存在多个振荡过程（图 2）。下面以第 4 和第 7 次垂直穿云过程作为典型时间段进行物理过程分析，其他时间段的形状虽然有所不同，但物理过程是类似的。第 7 次垂直穿云过程，飞机处于上升阶段，云底高度为 134 m，云顶高度为 409 m，穿云距离为 275 m（图 3、图 4）。第 4 次垂直穿云过程，飞机处于下降阶段，云底高度为 254 m，云顶高度为 478 m，穿云距离为 224 m（图 5、图 6）。

第 7 次垂直穿云过程中，在云的低层（0~50 m），云滴数浓度较小，在云底以上 40 m 处开始增大且变化较大，在 10 m 高度范围内增大到 398 cm^{-3} ，云滴平均半径在云底以上约 40 m 高度内具有较大的波动，云滴谱标准差也具有较大的波动（图 3），云滴谱垂直分布极不均匀（图 4.b）。第 4 次垂直穿云过程的变化类似（图 5、图 6.b）。云滴数浓度在云的低层有大幅增大（图 3.b、图 5.b），而气溶胶数浓度与云滴数浓度之间有很强的负相关性，相关系数在第 4 次和第 7 次垂直穿云过程中分别达到了 -0.92 和 -0.91（图 7），说明在低层有大量的气溶胶发生了核化并凝结增长成为小云滴。根据理论计算（Wallace and Hobbs, 2006），

在上升气块 CCN 的活化过程中, 尺度较大的粒子先被活化, 随后小粒子才发生活化过程, 这就导致云底附近的云粒子尺度不均匀, 云滴谱宽度较大。随着 CCN 活化过程的进行, 云滴数浓度也不断增大, 当过饱和度达到最大值时, 数浓度也达到最大值, 但刚活化的粒子尺度较小, 因此含水量在低层相对较小。综合来看, 低层大量气溶胶粒子的核化使得云滴谱标准差和离散度增大。

第 7 次垂直穿云过程中, 在云的中层 (50~200 m), 云滴尺度和含水量继续增长, 云滴谱标准差和离散度随高度增加逐渐减小 (图 3), 云滴谱由宽变窄 (图 4.b)。考虑到云滴尺度在半径 $6\ \mu\text{m}$ 左右, 碰并过程较弱, 可以用云滴凝结增长理论来解释。CCN 活化成云滴后, 云滴因凝结而继续增长, 含水量因此也逐渐增大。由于较小的云滴尺度比较大的云滴增长得快, 因此云滴尺度由不均匀趋于均匀, 云滴谱趋于单分散分布 (Wallace and Hobbs, 2006), 从而使得云滴谱宽度随高度增加逐渐减小。但是, 云滴数浓度存在波动变化, 含水量也相应存在一些突变的小值。绝热云中, 层积云内层的部分和积的部分会导致云滴数浓度发生变化, 但是对含水量的影响较小, 而目前发现含水量存在突变的小值; 另外, 由于该个例所探测的层积云中垂直速度普遍较小, 因此推断云系中积的部分较少。综合来看, 数浓度和含水量的变化更大可能是由夹卷产生的云洞 (cloud holes) 引起的。Gerber et al. (2005) 提出一种确定云洞的方法: 对含水量的原始数据 L_0 进行 8 s 时间步长的滑动平均并乘以调整系数 $K_1=0.97$ 得到一次平均 L_1 ; 将原始数据 L_0 中小于一次平均 L_1 的数据剔除后再次进行滑动平均并乘以调整系数 $K_2=0.94$ 得到二次平均 L_2 ; 此时原始数据 L_0 中小于二次平均 L_2 的数据点被认为是云洞。第 4 次垂直穿云过程的结果类似 (图 5、图 6.b)。

第 7 次垂直穿云过程中, 在云顶附近 (200~275 m), 云滴数浓度随高度减小, 云滴平均半径和含水量随高度继续增大, 体积平均半径在中层的稳定状态下有新的增长, 标准差和离散度增大, 云滴谱宽度有所增加 (图 3)。第 4 次垂直穿云过程在云顶以下 10 m 范围也有第 7 次垂直穿云过程的变化趋势 (图 5)。在这两次垂直穿云过程的顶部, 云滴数浓度减小, 虽然云滴谱峰值半径没有变化, 但是大滴数浓度有小幅增大, 云滴谱谱型由窄变宽, 尤其是第 7 次垂直穿云过程 (图 8.b), 这与云顶的夹卷混合过程有关。云顶以上的干空气夹卷进入云体, 干空气附近的云滴发生蒸发使干空气达到饱和并与云内其余空气块进行混合稀释, 使云滴数浓度减小, 云滴谱宽度增大 (Lu et al., 2011)。图 9 给出了第 4 次和第 7 次垂直穿云过程中云内云滴数浓度和气溶胶数浓度的垂直分布, 云内气溶胶和云滴数浓度呈负相关, 说明夹卷混合过程导致了蒸发。

为了更好地揭示云滴谱的垂直结构及其原因, 图 4、图 6 对比了垂直速度和云滴谱的垂直分布。可以看到, 虽然由于层积云的不均匀性, 垂直速度的垂直分布存在很大的波动, 但是可以针对垂直速度随高度变化的极大值和极小值附近高度进行分析。在垂直速度的极大值附近高度 (例如图 4 中 125 m), 对应的云滴谱数浓度较大, 云滴谱较窄, 这与凝结增长过程紧密相关 (Yum and Hudson, 2005), 此时夹卷的影响较弱甚至为绝热云。在垂直速度的极小值附近高度 (例如图 6 中 113 m), 对应的云滴谱数浓度较小, 云滴谱较宽。云顶和云洞中的夹卷混合过程导致垂直速度减小甚至为负, 云滴蒸发, 数浓度和云滴尺度减少, 云滴谱拓宽。

综合来看, 云滴谱宽度在云底附近较大, 随高度增加逐渐减小, 然后在云顶附近增大。微物理量的垂直分布与 Wang et al. (2009) 分析的海洋层积云的三个个例观测结果十分一致; 低层的垂直分布与 Peng et al. (2007) 的模式计算结果类似。Pawlowska et al. (2006) 对海洋层积云的飞机探测资料分析也得到了云滴

谱宽度随高度增加而降低的垂直分布，他认为主要是由于云滴尺度随高度增大的影响；而受不同程度夹卷混合的影响后，云滴谱宽度增加，这与本节分析结果一致。

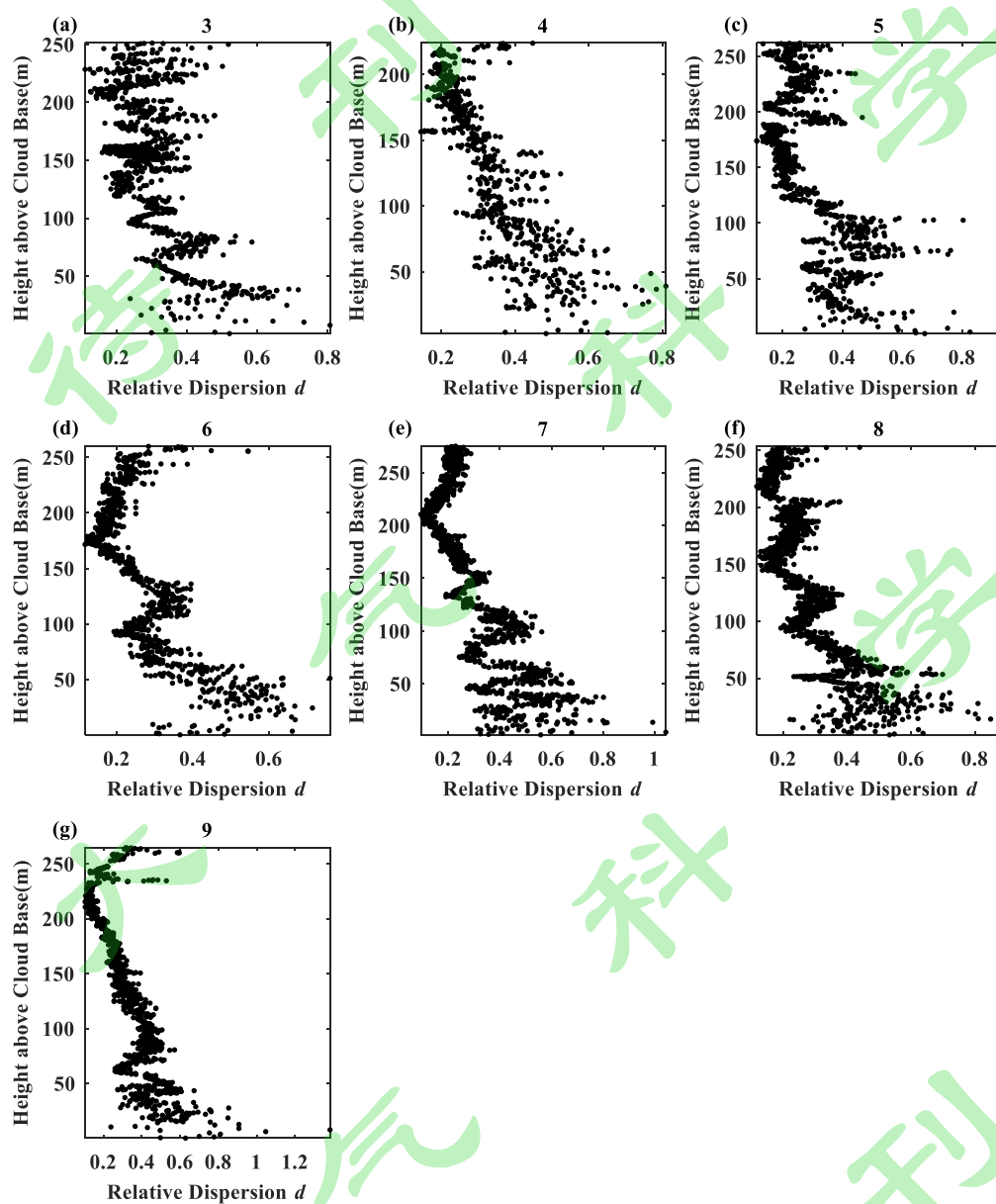


图2 (a-g) 分别为第3-9次垂直穿云过程中离散度的垂直分布

Figure 2 Vertical distribution of relative dispersion. (a-g) correspond to vertical leg 3-9, respectively.

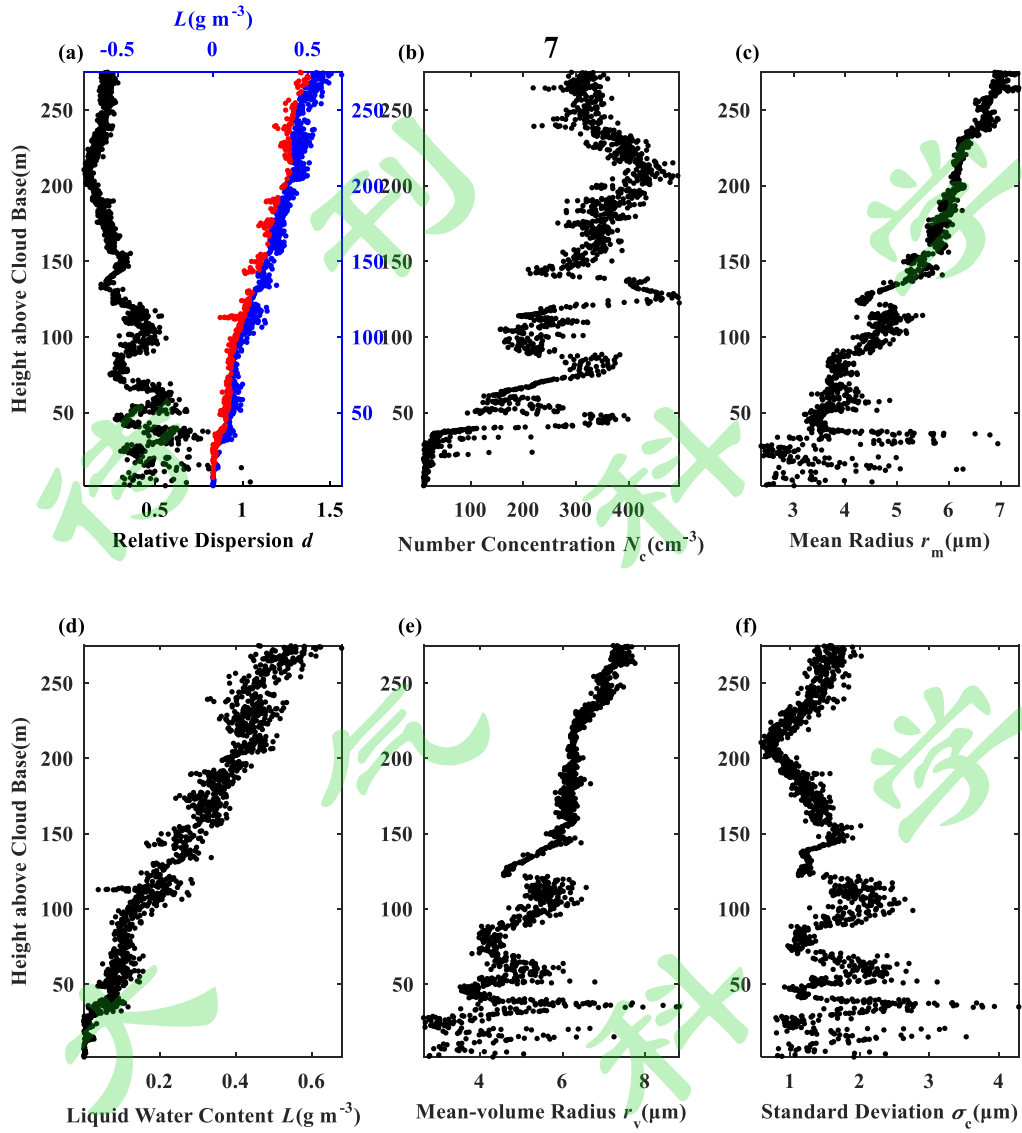


图 3 第 7 次垂直穿云过程中离散度 (a)、云滴数浓度 (b)、平均半径 (c)、含水量 (d)、体积平均半径 (e)、标准差 (f) 的垂直分布, (a) 中蓝色和红色点为含水量, 红色点为云洞

Figure 3 The vertical distribution of relative dispersion (a), cloud droplet number concentration (b), mean radius (c), liquid water content (d), mean-volume radius (e), and standard deviation (f) along leg 7. The blue and red dots in Figure 3.a represent liquid water content, and the data from cloud holes are highlighted in red.

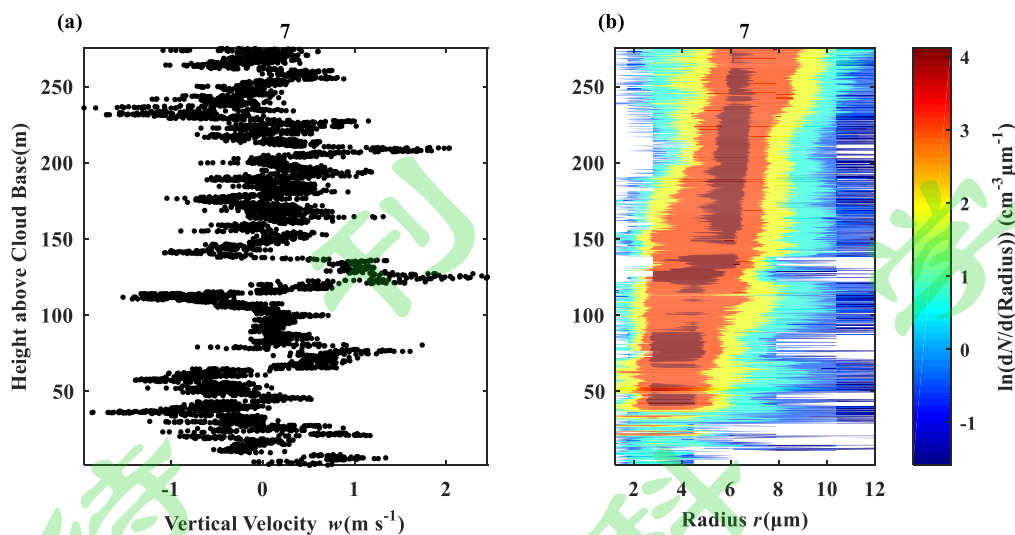


图 4 第 7 次垂直穿云过程中垂直速度 (a)、云滴谱 (b) 的垂直分布 (色标表示云滴数密度的自然对数)

Figure 4 The vertical distribution of vertical velocity (a) and cloud droplet spectra (b) along leg 7. The color bar shows the natural logarithm of the number density of cloud droplets.

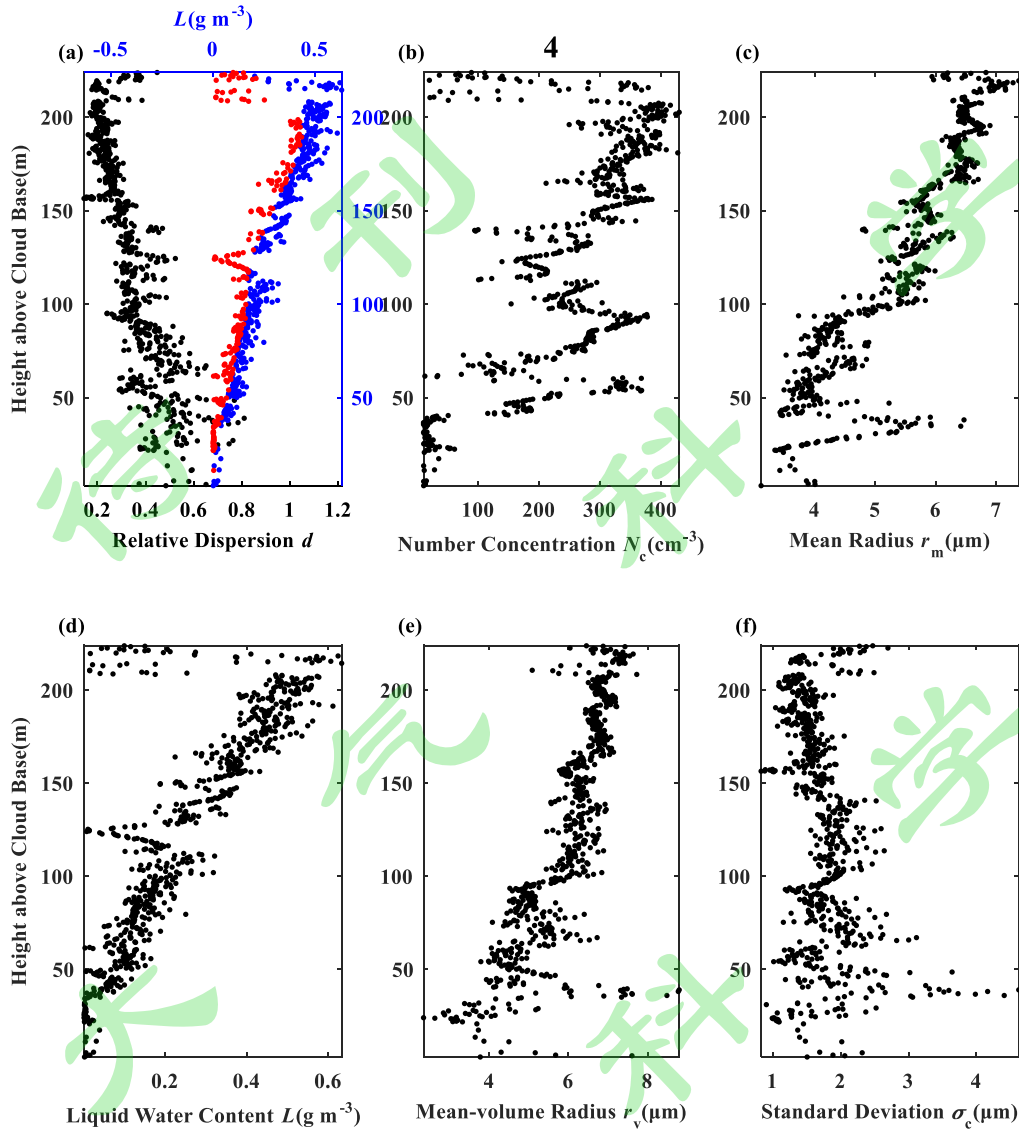


图 5 第 4 次垂直穿云过程中离散度 (a)、云滴数浓度 (b)、平均半径 (c)、含水量 (d)、体积平均半径 (e)、标准差 (f) 的垂直分布, (a) 中蓝色和红色点为含水量, 红色点为云洞

Figure 5 The vertical distribution of relative dispersion (a), cloud droplet number concentration (b), mean radius (c), liquid water content (d), mean-volume radius (e), and standard deviation (f) along leg 4. The blue and red dots in Figure 5.a represent liquid water content, and the data from cloud holes are highlighted in red.

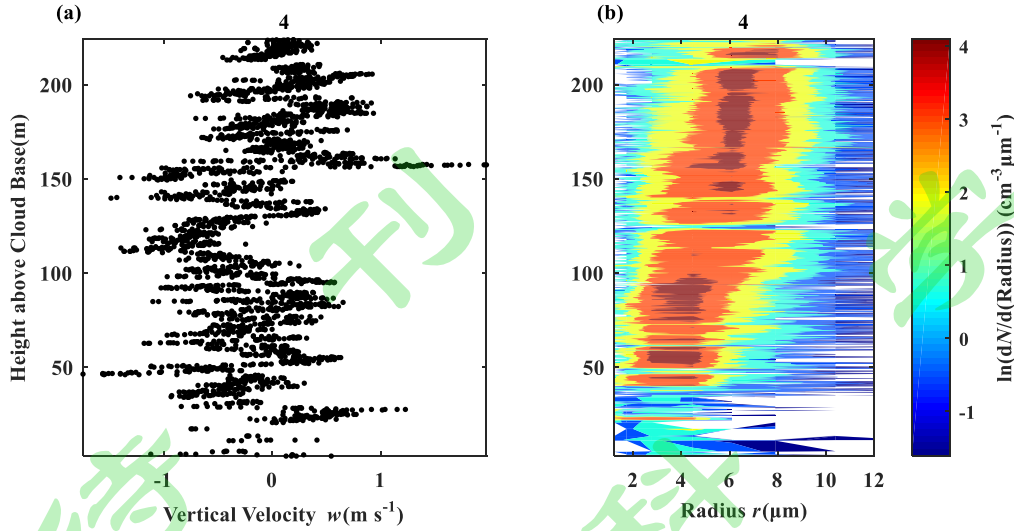


图6 第4次垂直穿云过程中垂直速度 (a)、云滴谱 (b) 的垂直分布 (色标表示云滴数密度的自然对数)

Figure 6 The vertical distribution of vertical velocity (a) and cloud droplet spectra (b) along leg 4. The color bar shows the natural logarithm of the number density of cloud droplets.

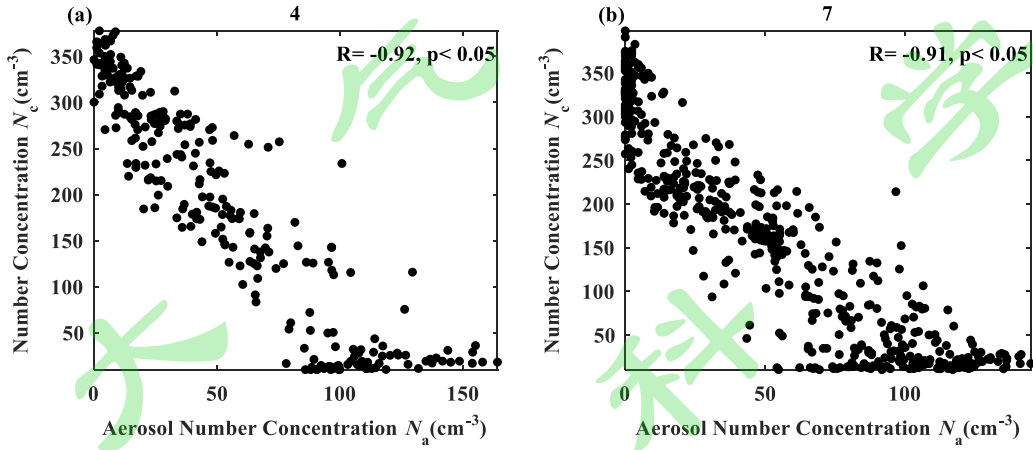


图7 第4 (a)、7 (b) 次垂直穿云过程中云底以上 100 m 内云滴数浓度 (N_c) 和气溶胶数浓度 (N_a) 的相关关系

Figure 7 Correlation between cloud droplet number concentration (N_c) and aerosol number concentration (N_a) within 100 m above the cloud base along leg 4 (a) and leg 7 (b).

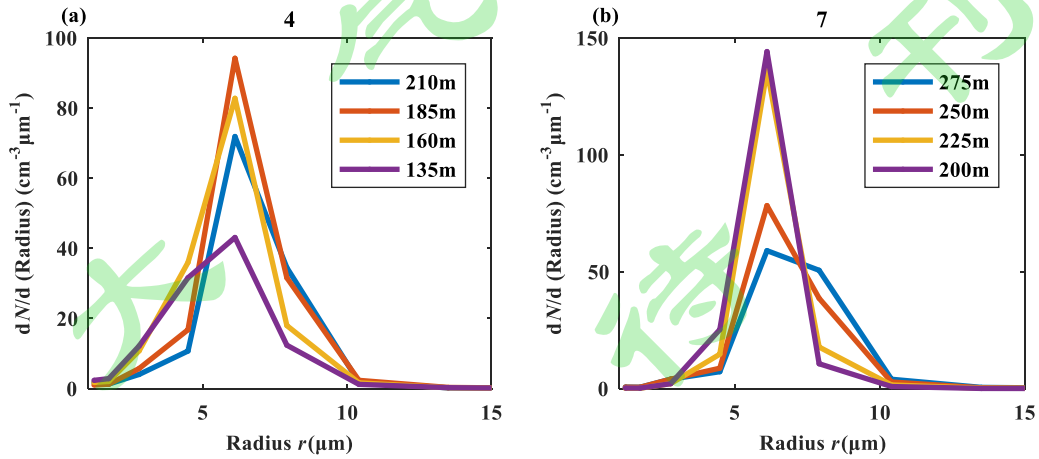


图8 第4 (a)、7 (b) 次垂直穿云过程中云顶附近不同高度的云滴谱 (图例中的高度为云底以上的高度)

Figure 8 Cloud droplet spectra at different heights near the cloud top along leg 4 (a) and leg 7 (b). The heights in the legends are the

values above cloud base.

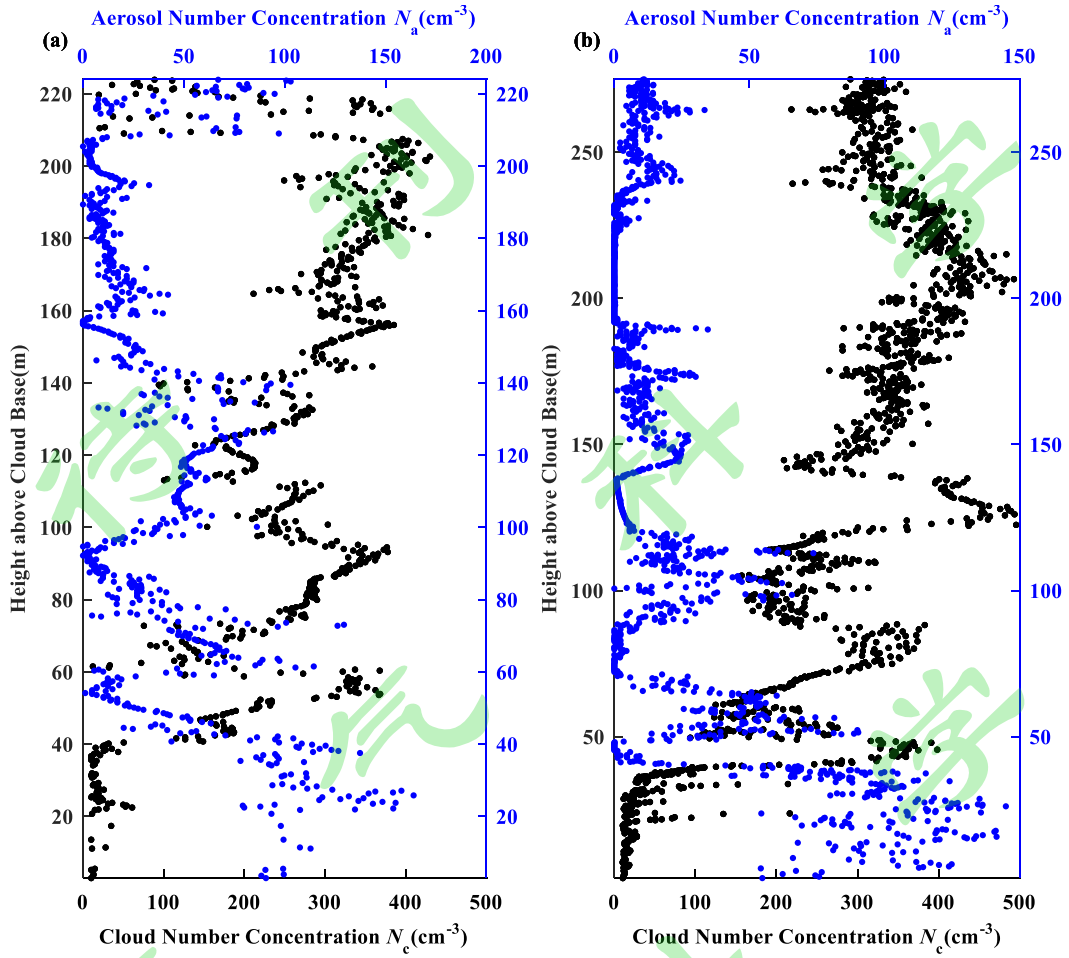


图9 第4 (a)、7 (b) 次垂直穿云过程中云滴数浓度 (N_c , 黑色点) 和气溶胶数浓度 (N_a , 蓝色点) 的垂直分布

Figure 9 The vertical distribution of cloud droplet number concentration (N_c , black dots) and aerosol number concentration (N_a , blue dots) along leg 4 (a) and leg 7 (b).

3.3 绝热云和云洞内的微物理特征

为了深入理解夹卷混合过程对云滴谱宽度的影响, 利用 3.2 节的方法把每次垂直穿云过程中的绝热部分和云洞部分分开, 分别分析绝热云和云洞内云滴谱宽度的影响因子。由于云底核化过程占主导, 云洞内的数据进一步剔除了云底以上 50 m 范围内的数据点; 对于非云洞的数据点, 认为绝热程度 (L/L_a , L 和 L_a 分别为观测到的和绝热的云中含水量) 大于 0.8 的部分为绝热云。 L_a 的计算方法是假定云底处空气团刚刚达到饱和, 随着高度增加经历可逆湿绝热过程后凝结出的含水量为绝热含水量 (Wallace and Hobbs, 2006; Salby, 1996)。

所有垂直穿云过程中绝热云和云洞内云微物理量的平均值如表 2 所示, 两者差异很大。绝热云内凝结增长占主导, 因此含水量、云滴数浓度和云滴尺度较大, 由于凝结增长过程使云滴趋于均匀, 离散度和标准差相对较小; 云洞内夹卷混合过程占主导, 因此含水量、云滴数浓度和云滴尺度相对较小, 离散度和标准差都比绝热云中大。总体而言, 绝热云中向上的垂直速度大于云洞中的垂直速度, 主要是由于云洞中夹卷的气块垂直速度是向下的。这也佐证了绝热云和云洞的划分标准是合理的。绝热云内出现一些垂直速度

的负值有可能与垂直速度的观测误差有关，但这并不妨碍比较云洞和绝热云垂直速度的差异。

表 2 垂直穿云过程中绝热云和云洞内微物理量平均值（表格中“|”前面为绝热云中平均值，“|”后面为云洞中平均值）

Table 2 Average values of microphysical properties in adiabatic clouds and cloud holes along each leg. The figures in front of the “|” represent the values in adiabatic clouds, and the figures after the “|” represent the values in cloud holes.

垂直穿云序号	云滴数浓度 (cm^{-3})	含水量 (g m^{-3})	平均半径 (μm)	体积平均半径 (μm)	离散度	标准差 (μm)	垂直速度 (m s^{-1})
3	308.03 203.78	0.30 0.17	5.64 5.33	6.02 5.85	0.26 0.32	1.42 1.68	0.19 -0.15
4	307.68 225.84	0.34 0.18	5.65 5.35	6.18 5.90	0.30 0.35	1.64 1.78	-0.03 -0.17
5	346.73 230.09	0.34 0.19	5.81 5.26	6.09 5.89	0.23 0.34	1.28 1.68	0.43 0.14
6	348.87 308.57	0.34 0.25	5.59 5.45	6.01 5.87	0.26 0.27	1.40 1.45	0.09 0.03
7	331.21 276.80	0.36 0.23	5.85 5.15	6.28 5.63	0.26 0.31	1.42 1.47	-0.06 -0.05
8	340.55 276.69	0.36 0.23	5.84 5.34	6.18 5.73	0.24 0.28	1.34 1.42	-0.12 -0.13
9	370.60 293.03	0.35 0.19	5.58 4.73	6.02 5.25	0.26 0.35	1.40 1.58	0.16 0.03

3.4 云滴谱宽度的影响因子

考虑到绝热云和云洞内发生的微物理过程的不同，下面将以第 7 次垂直穿云过程为例分别对绝热云和云洞内云滴谱宽度的影响因子进行分析，其他垂直穿云过程中绝热云和云洞内微物理量之间的相关系数在表 3 中给出，结论与第 7 次垂直穿云过程类似。

在绝热云内，云滴数浓度主要分布在大值区，而离散度主要分布在小值区，云滴数浓度随垂直速度的增大而增大，离散度随垂直速度的增大而减小，因此离散度与云滴数浓度呈现很好的负相关，相关系数达到-0.90，离散度与体积平均半径整体也呈现负相关（图 10），这主要是由绝热云中垂直速度的主导作用导致的。当垂直速度为正时，云内有更多的水汽供应，增加了过饱和度，促进了云凝结核的活化从而增加了云滴数浓度；而由于云滴凝结增长速率反比于其半径，正比于过饱和度（杨军等，2011），垂直速度增大使小云滴比大云滴增长得快，云滴尺度增大的同时越来越趋于均匀化，所有云滴尺度相近使得云滴谱变窄，从而导致了云滴谱宽度的减小（Liu et al., 2006; Peng et al., 2007）。Yum and Hudson（2005）在利用绝热凝结增长模式研究云滴谱增宽时发现，在给定 CCN 谱分布情况下，垂直速度的增大将导致云滴数浓度的增大以及云滴谱宽度的减小，Lu et al.（2012）在观测资料中也发现了云滴数浓度与垂直速度的正相关关系以及离散度与垂直速度的负相关关系。当垂直速度为负时，弱的下沉气流使小滴蒸发，数浓度减小，而云滴的蒸发使云滴谱由窄变宽，云滴谱宽度增大。

垂直速度导致云滴谱宽度与云滴数浓度呈现负相关的结论与 Wang et al.（2009）分析观测数据时得到的结论一致，但 Liu and Daum（2002）在观测的 13 个个例中的 11 个个例里发现了离散度与数浓度存在正相关性，Liu et al.（2006）在理论推导和数值模拟中也证明了离散度与数浓度的正相关关系，但 Liu et al.（2006）指出他的模拟结果是建立在云体绝热且均匀的条件下，许多其他因素或过程（包括调节系数、表面张力、溶解度、气体吸附、湍流夹卷、混合、液滴收集等）没有考虑在内。Chen et al.（2016）在研究气溶胶间接效应时发现云滴谱宽度的变化具有状态依赖性，模拟结果显示当 w/N_a （垂直速度和气溶胶数浓度

的比值)较大时离散度随数浓度增加而增大,而 w/N_a 较小时离散度随数浓度增加而减小,这可以解释不同研究得到的云滴谱宽度与数浓度之间不同的相关性。Chen et al. (2018) 还发现高度也是云滴谱宽度和数浓度的影响因子之一,本研究中图 10 数据点较分散可能与高度有关。

在云洞内,云滴数浓度、云滴尺度、垂直速度以及离散度之间的相关性与绝热云中相同(图 10),但背后的物理机制不同。可以看到云洞内数浓度和离散度在大值区和小值区分布相当,这主要是因为夹卷混合过程中的云滴蒸发和混合稀释导致了数浓度的减小和离散度的增大,而干空气的夹卷过程往往伴随着弱的下沉气流,垂直速度与数浓度成正相关、与离散度成负相关,使得离散度与数浓度呈现负相关。在实际大气中,云内实际含水量小于绝热含水量,这通常是由云内外湍流扩散或夹卷混合过程导致的,因此我们可以将绝热程度(L/L_a)作为云顶夹卷混合过程的判据。绝热程度越大,云体越接近绝热,则表示夹卷强度越小。在云洞内,数浓度和绝热程度具有很好的正相关,而离散度与绝热程度具有很好的负相关(图 11),说明夹卷强度越大,数浓度越小,云滴谱宽度越大。数据点的分散可能是由于飞机斜飞过程中穿过了多个不同的云洞。

综合来看,在绝热云和云洞中,垂直速度对云滴数浓度、云滴谱宽度以及云滴谱宽度与云滴数浓度的关系具有相似的影响,但具有不同的物理机制;垂直速度、云滴数浓度和绝热程度都是云滴谱宽度的重要影响因子。云滴谱宽度与云滴体积平均半径的负相关性(图 10.d)表明云滴尺度也是云滴谱宽度的影响因子。以往研究表明,在云滴谱宽度的参数化方面云滴体积平均半径比云滴数浓度表现更好(Wood, 2000; Liu et al., 2008)。在绝热云内,凝结增长过程导致云滴尺度的增大并趋于一致,使得离散度减小,离散度与云滴尺度呈现负相关;在云洞内,夹卷混合过程导致云滴蒸发,云滴尺度减小以及离散度的增大,离散度与云滴尺度呈现负相关。在云滴尺度相对较大时(6-8 μm)出现了离散度随体积平均半径增大而增大的现象,可能与云滴间的碰并过程有关。和其余垂直穿云过程一样,离散度与云滴体积平均半径整体上呈现负相关(表 3),这与 Liu et al. (2008) 的结论一致, Liu et al. (2008) 基于此提出的新的离散度参数化方案在大气环流模式(GCM)中评价气溶胶间接效应时也得到了应用(Xie et al., 2017)。

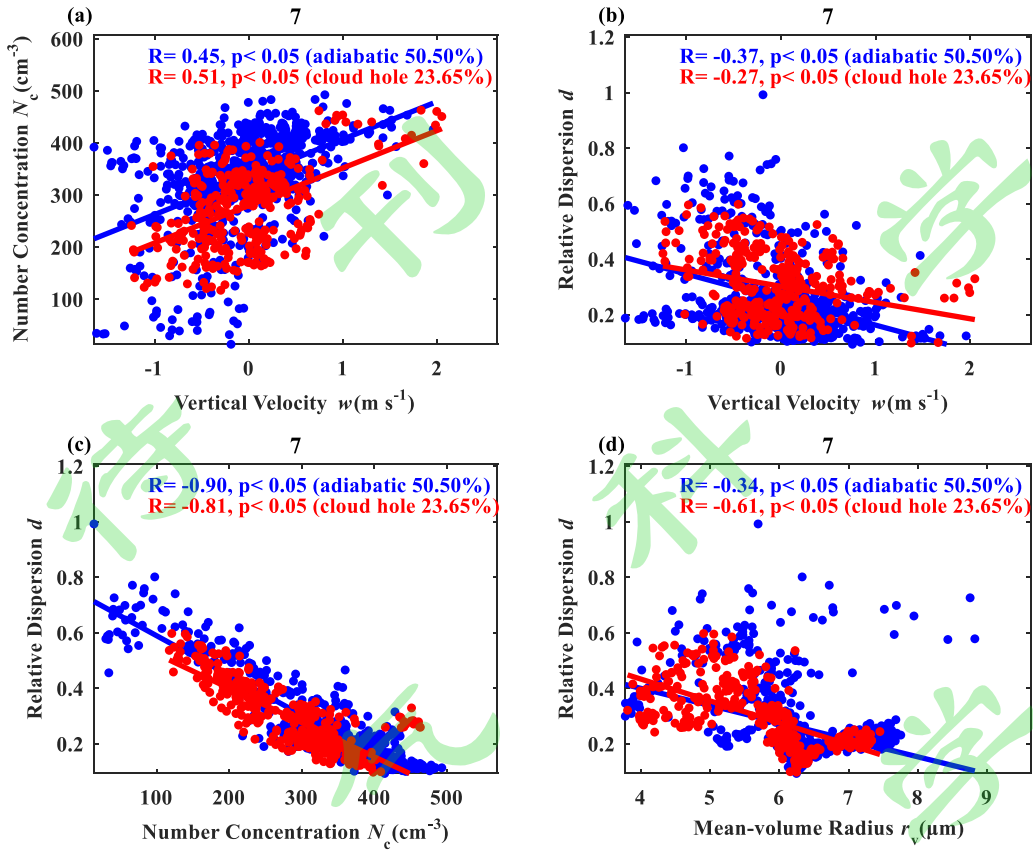


图 10 第 7 次垂直穿云过程绝热云和云洞内云滴数浓度与垂直速度 (a)、离散度与垂直速度 (b)、离散度与云滴数浓度 (c) 以及离散度与体积平均半径 (d) 之间的相关关系 (蓝色点为绝热云, 红色点为云洞, 百分数表示绝热云或云洞内数据点占该次穿云云内总数数据点的比例)

Figure 10 Correlation between cloud droplet number concentration and vertical velocity (a), relative dispersion and vertical velocity (b), relative dispersion and cloud droplet number concentration (c), relative dispersion and mean-volume radius (d) in adiabatic clouds and cloud holes along leg 7. Blue dots represent adiabatic clouds, and red dots represent cloud holes, and the percentage represents the proportion of the number of samples in adiabatic clouds or cloud holes to that along the whole leg.

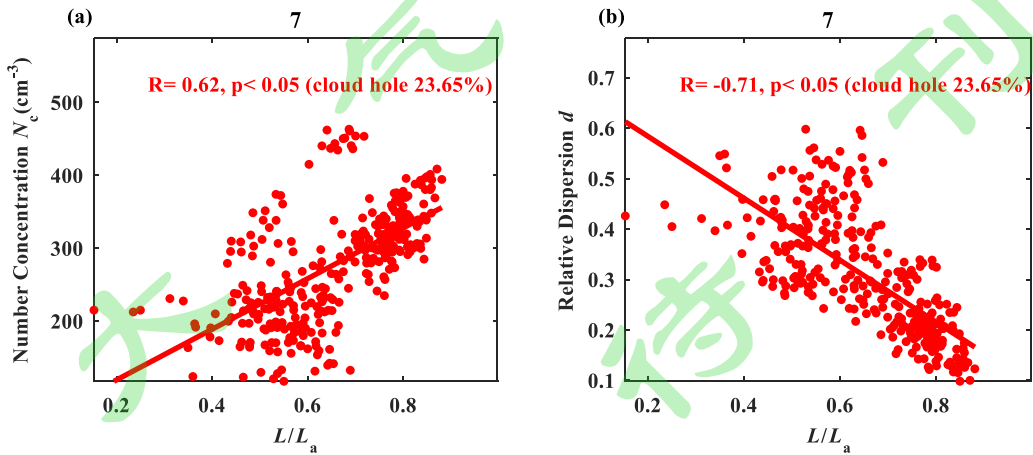


图 11 第 7 次垂直穿云过程中云洞内云滴数浓度与绝热程度 (L/L_a) (a)、离散度与绝热程度 (L/L_a) (b) 之间的相关关系 (L 和 L_a 分别为观测到的和绝热的云中含水量, 百分数表示云洞内数据点占该次穿云云内总数数据点的比例)

Figure 11 Correlation between cloud droplet number concentration and adiabatic fraction (L/L_a) (a), relative dispersion and adiabatic fraction (L/L_a) (b) in cloud holes along leg 7. L and L_a are observed and adiabatic cloud liquid water content, respectively. The percentage represents the proportion of the number of samples in cloud holes to that along the whole leg.

表 3 不同垂直穿云过程中微物理量之间的相关系数 (N_c 为云滴数浓度 (单位: cm^{-3}), w 为垂直速度 (单位: m s^{-1}), d 为离散度, X 为绝热程度 (L/L_a , L 和 L_a 分别为观测到的和绝热的云中含水量); 表中 “ N_c - w ” 表示云滴数浓度和垂直速度的相关系数, 其他表示方法相似; “*” 表示该相关系数未通过 95% 的显著性检验)

Table 3 Correlation coefficients between microphysical properties along different leg. N_c represents cloud droplet number concentration (cm^{-3}), w represents vertical velocity (m s^{-1}), d represents cloud droplet spectral width, and X represents the adiabatic fraction (L/L_a , L and L_a are observed and adiabatic cloud liquid water content, respectively). The “ N_c - w ” represents the correlation coefficient between cloud droplet number concentration and vertical velocity. “*” indicates that the correlation failed the 95% significance test.

垂直穿云 序号	绝热云				云洞					
	N_c - w	d - w	d - N_c	d - r_v	N_c - w	d - w	d - N_c	d - r_v	N_c - X	d - X
3	0.33	-0.07*	-0.69	-0.40	0.13	-0.31	-0.35	-0.43	0.79	-0.23
4	0.43	-0.39	-0.75	-0.55	0.20	-0.30	-0.45	-0.49	0.76	-0.46
5	0.21	-0.07*	-0.61	-0.39	0.46	-0.36	-0.78	-0.37	0.66	-0.73
6	0.58	-0.33	-0.70	-0.39	0.47	-0.05*	-0.52	-0.23	0.68	-0.66
7	0.45	-0.37	-0.90	-0.34	0.51	-0.27	-0.81	-0.61	0.62	-0.71
8	0.28	-0.36	-0.46	-0.59	0.37	-0.59	-0.63	-0.61	0.65	-0.74
9	0.36	-0.30	-0.89	-0.37	0.16	-0.06*	-0.68	-0.44	0.66	-0.62

4 结论

本文利用了 POST 项目 2008 年 7 月 19 日在加利福尼亚西海岸的海洋层积云的飞机观测资料, 分析了云滴谱宽度的垂直分布及其背后的微物理过程, 以及云滴谱宽度的影响因子。主要结论如下:

(1) 在此次海洋层积云探测中, 云滴谱宽度在云底附近较大, 随高度增加逐渐减小, 然后在云顶附近增大。

(2) 云滴谱宽度随高度的不同变化是因为起主导作用的微物理过程是不同的。在云的低层, 核化和凝结增长过程同时发生, 核化过程占主导, 因此云滴谱宽度在低层较大; 中层凝结增长过程起主导作用, 因此云滴谱宽度随高度增加逐渐减小; 在云顶附近, 凝结增长过程和夹卷混合过程共同作用, 但夹卷混合过程占主导, 因此云滴谱宽度增大。

(3) 云滴谱宽度的影响因子主要有垂直速度、云滴数浓度、云滴尺度和绝热程度。在绝热云和云洞中, 垂直速度对云滴数浓度、云滴谱宽度以及云滴谱宽度与云滴数浓度、云滴尺度的关系具有相似的影响, 但具有不同的物理机制。绝热云中垂直速度占主导, 垂直速度增大会促进云凝结核的活化使云滴数浓度增大, 促进云滴的凝结增长使云滴尺度增大、云滴谱宽度减小; 云洞中夹卷混合过程导致垂直速度减小、云滴蒸发数浓度减小、云滴谱宽度增大, 且该效应随着绝热程度的减小 (即夹卷强度的增大) 而增强。

(4) 基于不同微物理过程导致云滴谱宽度的不同变化, 未来在对云滴谱宽度进行参数化时需要考虑垂直速度、云滴数浓度、云滴尺度和绝热程度等因素的影响。

致谢 美国布鲁克海文国家实验室的刘延刚研究员对本文的分析提供了诸多帮助! POST 观测资料来自 <https://archive.eol.ucar.edu/projects/post> [2019-03-18], 感谢 POST 项目组的付出!

参考文献 (Reference)

- 陈宝君, 李爱华, 吴林林, 等. 2016. 暖底对流云催化的微物理和动力效应的数值模拟 [J]. 大气科学, 40 (2): 271-288. Chen Baojun, Li Aihua, Wu Linlin, et al. 2016. Modeling the microphysical and dynamical effects of silver iodide seeding of warm-based convective clouds [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (2): 271-288, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14271.
- 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]. Geophys Res Lett, 43 (4): 1780-1787, doi:10.1002/2016GL067683.
- Chen J, Liu Y, Zhang M, et al. 2018. Height dependency of aerosol-cloud interaction regimes [J]. J Geophys Res, 123 (1): 491-506, doi:10.1002/2017JD027431.
- 戴进, 余兴, 刘贵华, 等. 2011. 青藏高原雷暴弱降水云微物理特征的卫星反演分析 [J]. 高原气象, 30 (2): 288-298. Dai Jin, Yu Xing, Liu Guihua, et al. 2011. Satellite retrieval analysis on microphysical property of thunderstorm with light precipitation over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (2): 288-298.
- Deng W, Sun J M, Lei H C. 2018. Numerical investigations for the impacts of triple-moment and double-moment condensation schemes on the warm rain formation [J]. Atmos Ocean Sci Lett, 11 (6): 472-480, doi:10.1080/16742834.2018.1527176.
- 段婧, 毛节奏. 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 (in Chinese), 23 (3): 252-261, doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2008.03.005.
- Gerber H, Frick G, Malinowski S, et al. 2005. Holes and entrainment in stratocumulus [J]. J Atmos Sci, 62 (2): 443-459, doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2008.03.005, doi:10.1175/JAS-3399.1.
- Gerber H E, Frick G M, Jensen J B, et al. 2008. Entrainment, mixing, and microphysics in trade-wind cumulus [J]. J Met Soc Japan, (86): 87-106, doi:10.2151/jmsj.86A.87.
- 郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 2013. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008~2012 年) [J]. 大气科学, 37 (2): 351-363. Guo Xueliang, Fu Danhong, Hu Zhaoxia. 2013. Progress in cloud physics, precipitation, and weather modification during 2008-2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 351-363, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12321.
- 胡朝霞, 雷恒池, 郭学良, 等. 2007. 降水性层状云系结构和降水过程的观测个例与模拟研究 [J]. 大气科学, 31 (3): 425-439. Hu Zhaoxia, Lei Hengchi, Guo Xueliang, et al. 2007. Studies of the structure of a stratiform cloud and the physical processes of precipitation formation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (3): 425-439, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.03.06.
- Hudson J G, Yum S S. 1997. Droplet spectral broadening in marine stratus [J]. J Atmos Sci, 54 (22): 2642-2654,

doi:10.1175/1520-0469(1997)054<2642:DSBIMS>2.0.CO;2.

- Lasher-Trapp S G, Cooper W A, Blyth A M. 2005. Broadening of droplet size distributions from entrainment and mixing in a cumulus cloud [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 131 (605): 195-220, doi:10.1256/qj.03.199.
- 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 967-974. Lei Hengchi, Hong Yanchao Zhao Zheng, et al. 2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 967-974, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.21.
- Li Y, Yu R, Xu Y, et al. 2004. Spatial distribution and seasonal variation of cloud over China based on ISCCP data and surface observations [J]. *J Met Soc Japan*, 82 (2): 761-773, doi:10.2151/jmsj.2004.761.
- 刘屹岷, 燕亚菲, 吕建华, 等. 2018. 基于 CloudSat/CALIPSO 卫星资料的青藏高原云辐射及降水的研究进展 [J]. *大气科学*, 42 (4): 847-858. Liu Yimin, Yan Yafei, Lü Jianhua, et al. 2018. Review of current investigations of cloud, radiation and rainfall over the Tibetan Plateau with the CloudSat/CALIPSO dataset [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42 (4): 847-858, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17281.
- Liu Y, Daum P H. 2000. Spectral dispersion of cloud droplet size distributions and the parameterization of cloud droplet effective radius [J]. *Geophys Res Lett*, 27 (13): 1903-1906, doi:10.1029/1999GL011011.
- Liu Y, Daum P H. 2002. Indirect warming effect from dispersion forcing [J]. *Nature*, 419 (6907):580-581, doi:10.1038/419580a.
- Liu Y, Daum P H, Yum S S. 2006. Analytical expression for the relative dispersion of the cloud droplet size distribution [J]. *Geophys Res Lett*, 33 (2): 356-360, doi:10.1029/2005GL024052.
- Liu Y, Daum P H, Guo H, et al. 2008. Dispersion bias, dispersion effect, and the aerosol-cloud conundrum [J]. *Environ Res Lett*, 3 (4): 045021, doi:10.1088/1748-9326/3/4/045021.
- Liu Y, Lu C, Li W. 2017. Skewness of cloud droplet spectrum and an improved estimation for its relative dispersion [J]. *Meteor Atmos Phys*, 129 (1): 47-56, doi:10.1007/s00703-016-0458-9.
- Lu C, Liu Y, Niu S. 2011. Examination of turbulent entrainment-mixing mechanisms using a combined approach [J]. *J Geophys Res*, 116: D20207, doi:10.1029/2011JD015944.
- Lu C, Liu Y, Niu S, et al. 2012. Observed impacts of vertical velocity on cloud microphysics and implications for aerosol indirect effects [J]. *Geophys Res Lett*, 39: L21808, doi:10.1029/2012GL053599.
- Lu C, Liu Y, Niu S, et al. 2018. Broadening of cloud droplet size distributions and warm rain initiation associated with turbulence: an overview [J]. *Atmos Ocean Sci Lett*, 11 (2): 123-135, doi:10.1080/16742834.2018.1410057.
- Lu M L, Conant W C, Jonsson H H, et al. 2007. The Marine Stratus/Stratocumulus Experiment (MASE): Aerosol-cloud relationships in marine stratocumulus [J]. *J Geophys Res*, 112: D10209, doi:10.1029/2006jd007985.
- Ma J, Chen Y, Wang W, et al. 2010. Strong air pollution causes widespread haze-clouds over China [J]. *J Geophys Res*, 115: D18204, doi:10.1029/2009JD013065.
- Martin G M, Johnson D W, Spice A. 1994. The measurement and parameterization of effective radius of droplets in warm stratocumulus clouds [J]. *J Atmos Sci*, 51 (13): 1823-1842, doi:10.1175/1520-0469(1994)0512.0.CO;2.
- Martins J, 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]. *Environ Res Lett*, 4 (1): 015002, doi:10.1088/1748-9326/4/1/015002.
- Miles N L, Verlinde J, Clothiaux E E. 2000. Cloud droplet size distributions in low-level stratiform clouds [J]. *J Atmos Sci*, 57 (2):

- 295-311, doi:10.1175/1520-0469(2000)057<0295:CDSDIL>2.0.CO;2.
- Pawlowska H, Grabowski W W, Brenguier J L. 2006. Observations of the width of cloud droplet spectra in stratocumulus [J]. *Geophys Res Lett*, 33 (19): 277-305, doi:10.1029/2006gl026841.
- Peng Y, Lohmann U. 2003. Sensitivity study of the spectral dispersion of the cloud droplet size distribution on the indirect aerosol effect [J]. *Geophys Res Lett*, 30 (10):1507, doi:10.1029/2003gl017192.
- Peng Y, Lohmann U, Leaitch R, et al. 2007. An investigation into the aerosol dispersion effect through the activation process in marine stratus clouds [J]. *J Geophys Res*, 112: D11117, doi:10.1029/2006JD007401.
- Rogers R R, Yau M K. 1996. A short course in cloud physics [M]. Elsevier, 293pp.
- Rotstajn L D, Liu Y. 2003. Sensitivity of the first indirect aerosol effect to an increase of cloud droplet spectral dispersion with droplet number concentration [J]. *J Climate*, 16 (21): 3476-3481, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3476:SOTFIA>2.0.CO;2.
- Rotstajn L D, Liu Y. 2009. Cloud droplet spectral dispersion and the indirect aerosol effect: Comparison of two treatments in a GCM [J]. *Geophys Res Lett*, 36: L10801, doi:10.1029/2009GL038216.
- Salby M L. 1996. Fundamentals of atmospheric physics [M]. Elsevier, 627pp.
- 石广玉, 王标, 张华, 等. 2008. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. *大气科学*, 32 (4): 826-840. Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, et al. 2008. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 826-840, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.11.
- 唐洁, 郭学良, 常祎. 2018. 青藏高原那曲地区夏季一次对流云降水过程的云微物理及区域水分收支特征 [J]. *大气科学*, 42 (6): 1327-1343. Tang Jie, Guo Xueliang, Chang Wei. 2018. Cloud microphysics and regional water budget of a summer precipitation process at Naqu over the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42 (6): 1327-1343, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17202.
- Wallace J M, Hobbs P V. 2006. Atmospheric science: An introductory survey [M]. Elsevier, 483pp.
- 汪宏七, 赵高祥. 1994. 云和辐射——(I)云气候学和云的辐射作用 [J]. *大气科学*, 18 (S1): 910-932. Wang Hongqi, Zhao Gaoxiang. 1994. Cloud and radiation-- (I) cloud climatology and cloud radiation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 18 (S1): 910-932, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.z1.15.
- Wang J, Daum P H, Yum S S, et al. 2009. Observations of marine stratocumulus microphysics and implications for processes controlling droplet spectra: Results from the Marine Stratus/Stratocumulus Experiment [J]. *J Geophys Res*, 114: D18210, doi:10.1029/2008JD011035.
- Wang Y, Niu S, Lu C, et al. 2019. An observational study on cloud spectral width in North China [J]. *Atmosphere*, 10 (3): 109, doi:10.3390/atmos10030109.
- Wood R. 2000. Parametrization of the effect of drizzle upon the droplet effective radius in stratocumulus clouds [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126 (570): 3309-3324, doi:10.1002/qj.49712657015.
- 肖辉, 徐华英, 黄美元. 1988. 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): 121-130. Xiao Hui, Xu Huaying, Huang Meiyuan. 1988. Numerical simulation of cloud droplet spectra formation in cumulus (i)--effects of salt core spectrum and concentration [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 12 (2): 121-130, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1988.03.11.

- 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, Liu X, Peng Y, et al. 2013. Numerical simulation of clouds and precipitation depending on different relationships between aerosol and cloud droplet spectral dispersion [J]. Tellus B, 65 (1): 121-132, doi:10.3402/tellusb.v65i0.19054.
- 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]. Atmos Chem Phys, 17 (9): 5877-5892, doi:10.5194/acp-17-5877-2017.
- 杨军, 陈宝君, 银燕. 2011. 云降水物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 364pp. Yang Jun, Chen Baojun, Yin Yan. 2011. Physics of Clouds and Precipitation [M]. China Meteorological Press (in Chinese), 364pp.
- 杨洁帆, 雷恒池, 胡朝霞. 2010. 一次层状云降水过程微物理机制的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 34 (2): 275-289. Yang Jiefan, Lei Hengchi, Hu Zhaoxia. 2010. Simulation of the stratiform cloud precipitation microphysical mechanism with the numerical model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 275-289, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.02.04.
- 岳治国, 余兴, 刘贵华, 等. 2018. NPP/VIIRS 卫星反演青藏高原夏季对流云微物理特征 [J]. 气象学报, 76 (6): 968-982. Yue Zhiguo, Yu Xing, Liu Guihua, et al. 2018. NPP/VIIRS satellite retrieval of summer convective cloud microphysical properties over the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 76 (6): 968-982, doi:10.11676/qxxb2018.051.
- Yum S S, Hudson J G. 2005. Adiabatic predictions and observations of cloud droplet spectral broadness [J]. Atmos Res, 73 (3-4): 203-223, doi:10.1016/j.atmosres.2004.10.006.
- 张华, 杨冰韵, 彭杰, 等. 2015. 东亚地区云微物理量分布特征的 CloudSat 卫星观测研究 [J]. 大气科学, 39 (2): 235-248. Zhang Hua, Yang Bingyun, Peng Jie, et al. 2015. The characteristics of cloud microphysical properties in East Asia with the CloudSat dataset [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (2): 235-248, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.13313.
- 张正国, 卢广献, 汤达章, 等. 2018. 广西秋季层状云微物理特征分析 [J]. 气象科技, 46 (3): 545-555. Zhang Zhengguo, Lu Guangxian, Tang Dazhang, et al. 2018. Microphysical characteristics of stratiform clouds in autumn in Guangxi [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 46 (3): 545-555, doi:10.19517/j.1671-6345.20170223.
- 赵春生, 石坂隆. 2004. 层积云覆盖的海洋边界层云详细微物理过程的数值模拟 [J]. 气象学报, 62 (1): 87-95. Zhao Chunsheng, Yutaka Ishizaka. 2004. Numerical study on cloud microphysics of stratocumulus-topped marine boundary [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (1): 87-95, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2004.01.010.
- Zhao C, Tie X, Brasseur G, et al. 2006. Aircraft measurements of cloud droplet spectral dispersion and implications for indirect aerosol radiative forcing [J]. Geophys Res Lett, 33: L16809, doi:10.1029/2006gl026653.
- 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: 19, doi:10.3390/atmos10010019.
- 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, 14 (6): 1-7. Zhou Xiuji, Gu Zhenchao. 1963. Several questions on cloud/fog microphysics and precipitation [J]. Science Bulletin (in Chinese), 14 (6): 1-7, doi:10.1360/csb1963-8-6-1.