

田磊,舒志亮,常倬林,等.2023.云中湍流特征及其在云降水中的作用研究进展[J].暴雨灾害,42(5):499–507. TIAN Lei, SHU Zhiliang, CHANG Zhuolin, et al. 2023. Advances in the studies of turbulence properties in the cloud and the role of turbulence in cloud and precipitation [J]. Torrential Rain and Disasters, 42(5):499–507 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–198

云中湍流特征及其在云降水中的作用研究进展

田磊^{1,2}, 舒志亮^{1,2}, 常倬林^{1,2}, 邓佩云^{1,2}, 孙艳桥^{1,2},

(1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002;
2. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 银川 750002)

摘要: 大气湍流是一种无序的、非确定性的、非平衡的大气运动, 它可提高云滴碰撞效率, 加速云滴增长速度, 在云和降水形成及发展过程中起着十分重要的作用。本文综述了国内外近60 a来云中湍流的研究进展, 重点介绍了云宏微观结构特征及云中湍流对云滴碰并增长方面取得的研究成果, 以期为进一步观测研究云动力学过程、完善湍流-云微物理相互作用理论及优化云参数化方案提供重要参考。

关键词: 云中湍流; 暖云; 云滴; 碰撞效率

中图分类号: P421.1

文献标识码: A

DOI: 10.12406/byzh.2022–198

Advances in the studies of turbulence properties in the cloud and the role of turbulence in cloud and precipitation

TIAN Lei^{1,2}, SHU Zhiliang^{1,2}, CHANG Zhuolin^{1,2}, DENG Peiyun^{1,2}, SUN Yanqiao^{1,2}

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002; 2. Ningxia Key Lab of Meteorological Disaster Prevention and reduction, Yinchuan 750002)

Abstract: Turbulence is an unregular atmospheric motion. Through increasing the collision efficiency of cloud droplets and accelerating the growth rate of cloud droplets, it plays an important role in the processes of cloud and precipitation formation and development. The studies of turbulence in clouds during recent decades are summarized in this paper. This paper mainly introduces the research results of the collision and growth of cloud droplets as well as the micro and macro characteristics of cloud structures. The contents in this paper are expected to improve observations and research on cloud dynamics processes, turbulence–cloud microphysical interaction theory, and optimization of cloud parameterizations.

Keywords: turbulence in the cloud; warm clouds; cloud droplet; collision efficiency

引言

湍流是一种高度复杂的三维非稳态、带旋转的不规则流动。在湍流中,流体的各种物理参数如速度、压力、温度等都随时间与空间发生随机的变化。1904年,Prandtl提出了混合长理论,形成了最基本的湍流理论基础。此后近60 a,国内外学者通过理论推导计算,先后形成了湍流能谱理论、湍流相似理论、自由对

流大气湍流理论等,为湍流的研究奠定了坚实的理论基础。20世纪70年代后,随着大气探测技术的发展,国内外先后开展了许多大气湍流观测试验,对草地、湖泊、海洋、沙漠等不同下垫面湍流状况进行了深入探究,揭示了下垫面等因素引发的中尺度运动对局地湍流的影响,增进了对不同下垫面水热交换特征的深入认识,同时发现湍流在云和降水形成及发展过程中起着十分重要的作用(张宏昇, 2014),包括从气溶胶粒

收稿日期: 2022–10–05; 定稿日期: 2023–06–23

资助项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEG03005); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U22A20577); 青藏高原科考项目(2019QZKK0104–02–07); 宁夏自然科学基金项目(2023AAC03800)

第一作者: 田磊, 主要从事大气物理及人工影响天气研究。E-mail: tianl419@163.com

通信作者: 舒志亮, 主要从事人工影响天气研究。E-mail: 8633204@163.com

子到云粒子再到雨滴的演化进程中交织着气溶胶凝结成核、液滴凝结增长、云滴和雨滴碰并增长等微物理过程;云中液滴在凝结生长或碰并增长过程中,湍流不仅会使液滴运动轨迹更加复杂,而且会使云中温度和湿度出现剧烈波动,从而使液滴的生长过程有很大差异(Grabowski and Wang, 2009)。湍流-粒子相互作用是云微物理变化、污染物扩散及粒子在大气中运动等许多环境过程的关键影响因子之一(Eames, 2008; Devenish et al., 2012; Rosa et al., 2013)。

湍流会影响云滴数浓度、云滴谱等微物理特征以及云结构特性,且通过混合和夹卷过程与云的生命周期直接相关(Smith and Jonas, 1996; 陆春松和徐晓齐, 2021)。在自然云条件下,由于过饱和度较低和生长时间有限,通过水汽凝结增长很难产生半径接近 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的云滴,而云滴重力碰并仅当液滴半径达到约 $40\text{ }\mu\text{m}$ 时才有效,很难解释云滴在半径 $15\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的快速生长(周秀骥, 1963; Brenguier and Chaumat, 2001);另外,在国内外,研究者均多次观测到厚度 $1\sim 2\text{ km}$ 的云,在 1 h 左右就能形成降水,而且雨滴体积很大,在浓积雨云中有时也能在 0.5 h 左右就能形成降水,这些现象如不考虑湍流的影响是无法合理解释的。因此,研究湍流在云滴生长中的作用对于量化暖云中的云雨转化和雨量非常重要(Lau and Wu, 2003),准确描述湍流对液滴生长的影响是云大涡模拟的主要挑战之一(Shaw et al., 2002; Boutle and Abel, 2012)。另外,学者对湍流在云中液滴生长中的作用认识不统一,对其在云微物理过程的具体影响尚不十分明确(Lu et al., 2018)。

为了深入理解云中湍流特征及其对云降水的影响,本文对该方面研究进展进行综述,以期为进一步理解云动力学过程、完善湍流-云微物理相互作用理论及其模拟计算、揭示大范围空间和时间尺度上的湍流-云相互作用、优化数值天气预报和全球气候模型中云参数化方案为目的的自然云及云中湍流观测研究提供重要参考。近 60 a 来,国内外学者在云中湍流特征及其在云降水中的作用方面有许多研究成果,现总结如下。

1 云中湍流特征研究

自然云环境中湍流时空变化很大且雷诺数很高,在实验室或模拟计算研究中模拟或假定的云条件和自然云相比还存在较大差异(Siebert et al., 2010),因此观测研究云中湍流特征就显得非常重要。

Dmitriev 等(1984)通过飞机观测研究了俄罗斯北部急流卷云中风场和温度场的结构,发现了湍流区的间歇性、风场和温度场的不均匀性;平均湍流强度在云层中部最大,而卷云上方的平均湍流强度略大于云

内平均值;云中湍流区的平均长度为 40 km ,晴朗的条件下则为 60 km ;微尺度($100\text{ m}\sim 1\text{ km}$)垂直速度功率谱表现出 $-5/3$ 的幂律;湍流强度具有空间各向异性的特点。Quante 和 Brown(1992)通过飞机观测研究了锋面卷云和急流卷云的湍流特性,发现一次飞行中计算出的 Richardson 数随高度的变化很大,其值低于 0.25 的临界值,表明云场中存在数个湍流层。在急流卷云某些位置观测到的垂直速度方差比在大尺度锋面卷云中的大 1 个数量级。典型的湍流长度尺度在不同区域下变化很大。对于小于 500 m 的尺度,湍流区垂直风速标准差与水平风速标准差的比值为 0.8 ,而无云区这一比值为 0.5 。湍流区的能量耗散率约为 $2\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-3}$,静稳区的能量耗散率较小。Spyksma 和 Bartello(2008)研究发现,干空气和湿空气中的湍流特征也可能存在细微的差异。另外,湍流强度因云的类型和生命期的不同而有很大的不同。在层云中,湍流耗散率约为 $10^{-3}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-3}$,小积云中湍流耗散率约为 $10^{-2}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-3}$ (Mazin et al., 1984)。在深厚的积云中,观测的湍流耗散率可达 $0.2\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-3}$ (Weil et al., 1989)。Hsieh 等(2009)也发现云中湍流很大程度上表现出强烈的大规模不均匀性和非平稳性。Siebert 等(2006a, 2006b, 2010)利用机载云观测系统(ACTOS)在观测研究小型云体结构(包括速度场的特征)方面取得了重大进展(图1),第一次实现了对云中小规模湍流以及云微物理量的可靠观测。观测研究表明,云团(平均湍流耗散率分别为 10^{-3} 和 $10^{-4}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-3}$ 的薄积云和层积云)内部的速度场结构接近均匀各向同性的高雷诺数湍流。Matthew 等(2015)通过全息测量研究发现,湍流云是不均匀的,云和纯净空气在 $1\sim 10\text{ mm}$ 尺度上仍有急剧的过渡。液滴的大小分布在数量密度上波动很大,但平均液滴直径几乎不变。

Kollias 和 Albrecht(2000)利用垂直指向的 3 mm 波长多普勒雷达,研究了大陆层云中湍流尺度的垂直速度结构,发现垂直速度方差剖面在云层上部有一个明显的峰值($0.7\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$),在云层下部也有一个峰值($0.2\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$)。Parameswaran 等(2003)利用单站激光雷达和 MST(Mesosphere Stratosphere and Troposphere)雷达研究了热带对流层顶下形成的海流云和大气湍流,发现卷云的物理和光学特性表现出明显的时间和空间变异性。云区湍流扩散参数的垂直梯度在卷云中出現显著的不连续性。陈柏纬等(2008)提出在不同强度湍流条件下,可以在计算的飞机下滑航道线段上将多普勒天气雷达谱宽平均值与湍流强度平均值之间建立经验关系,从而由谱宽直接计算得到湍流强度。Benmoshe 和 Khain(2014)模拟发现,混合相对流云中湍流强度随高度的分布很不均匀,湍流耗散率最大值出

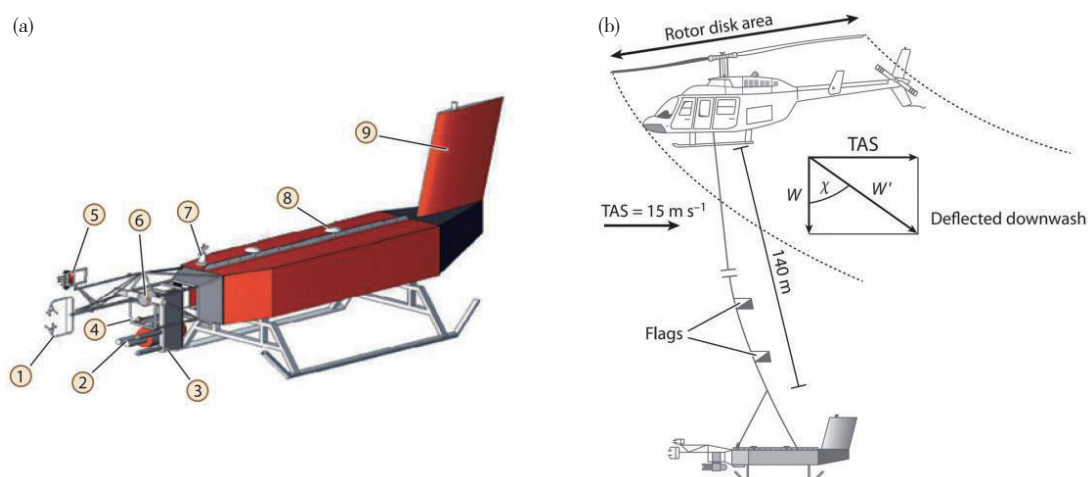


图1 机载云中湍流观测系统(①声波风速仪,②快速散射光谱仪探头,③多普勒相位干涉仪,④撞击式取样器,⑤快速温度计,⑥粒子体积监测仪,⑦Nevzorov 探头,⑧主体支架,⑨尾部部件)(a)及其在直升机上的悬挂方式(b)示意图(Siebert et al.,2006b)

Fig.3 Sketch of the Airborne Cloud Turbulence Observation System (① Sonic anemometer,② M-Fast Forward Scattering Spectrometer Probe,③ Phase-Doppler interferometer,④ Impactor inlets,⑤ Ultra-Fast Thermometer,⑥ Particle Volume Monitor,⑦ Nevzorov probe,⑧ The main body bracket,⑨ the tail unit) (a) and its suspension mode on the helicopter (adapted from Siebert et al.,2006b)

现在上升气流区顶部附近,为 $0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$,特征尺度为500~1 000 m,云中湍流耗散率的平均值约为最大值的50%。黄兴友等(2020)利用地基毫米波雷达对2016年8月8日四川稻城的一次层状云过程云内湍流进行了反演并分析其特性,发现云内湍流耗散率在云底、云顶较大,云内较小,量级在 $10^{-8} \sim 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 。

通过飞机、雷达及高山站原位观测发现了云中湍流具有不均匀性和非平稳性,明确了云中湍流强度在水平及垂直方向上的分布特征,得出了不同类型云中的湍流耗散率的大小。获得湍流的上述特征对正确理解云中湍流非常重要。因云中湍流的复杂性及观测设备的局限性,湍流对云及降水的影响还需要结合理论计算、数值模拟等手段进行研究分析。

2 湍流在云降水中的作用研究

湍流对云和降水的影响因其复杂性一直是云物理学中较难解决的科学难题之一(Grabowski and Wang, 2009)。湍流可提高液滴几何碰撞速率和碰撞效率,与仅考虑重力碰并时的碰撞率相比,可使液滴之间的碰撞率增加好几倍,进而促进降水快速形成及地面降水量的增加。另外,大气中气象条件(包括云微物理量本身)的起伏会加快云滴的重力碰并生长速度,对降水过程起着十分重要的作用。

2.1 云中湍流特性及其对随机凝结增长的影响

20世纪60年代,国内外研究者开始通过理论计算的方式研究气流起伏对云滴随机凝结增长的影响。顾震潮(1962)总结国内外云滴谱的理论研究后指出在云滴谱的研究中应该考虑气象条件起伏对云滴形成

过程的作用。顾震潮和詹麗珊(1962)计算了云中小水滴浓度有起伏时的云雾滴生长特征,发现在起伏条件下,由凝结增长形成的比较窄的云滴谱,也可以比较快的长出大云滴,这是均匀重力碰并做不到的。周秀骥(1963)发展了云滴生长的随机理论和暖云降水的微物理机制,发现对于半径 $1 \sim 20 \mu\text{m}$ 的云滴生长和形成来说起伏凝结与湍流电碰并共同起着重要作用,在一定的湍流强度下,完全可以在10~30 min内形成半径为 $20 \mu\text{m}$ 左右、浓度为每立方厘米10个的大云滴。徐华英和顾震潮(1963)在理论计算雨滴碰并增长时发现,气流起伏对云滴在云中运动的影响可能降低形成降水所要求的云厚,即同样的云厚下形成的雨滴可以更大一些,这可以较好的解释通常看到的薄云降水的形成。考虑了气流起伏以后出云水滴有一个分布谱,这说明同样大小的胚滴,在云中由于各自成长环境的不同最后形成不同大小雨滴。徐华英(1964)通过数值计算分析了气流起伏量大小对降水的影响后发现,在气流有起伏的降水过程中起伏量太大会造成水滴分布过于分散,使早期水滴的出云率很高,出云底的雨滴中小水滴很多,而留在云中的时间较长,这样可以长到较大半径的水滴数就少了,这对降水形成不利;当起伏量非常小时,情况和均匀气流理论相近,对薄云降水并不有利;这样看来,气流起伏太大和太小都不利于促进降水,最佳的大小与云的具体情况有关,只有在垂直气流的平均速度、起伏大小、含水量及云厚等适当的配置之下才可能形成降水。

Shaw等(1998)提出了云滴谱展宽的机制,云滴优先集中在湍流流场中的低涡度区域;高涡度区域(低

液滴浓度)比低涡度区域(高液滴浓度)有更高的过饱和度和;在高涡度区域的液滴有较快的增长速率,一些液滴的增长速率大于经典凝结增长理论预测。Shaw 等(2002)用直接数值模拟(DNS)方法讨论了水汽扩散对湍流流场与云滴增长的相互作用,结果表明,随着耗散率的增加,云滴谱宽变窄,过饱和扰动的去相关时间减小。Celani 等(2005)研究发现,湍流速度场使得液滴轨迹与过饱和度之间存在相关性,从而提高了液滴增长速率,并使滴谱迅速扩展。Lanotte 等(2009)通过直接数值模拟发现滴谱拓宽速度随湍流雷诺数的增加而增大。Gaetano 等(2015)利用随机模型和直接数值模拟研究了湍流对云滴凝结增长的影响。结果表明,液滴尺寸分布的方差和 $t^{1/2}$ (t 为模拟计算时长)成正比,其生长速率与湍流积分尺度成正比,但与平均湍流耗散无关(图2)。

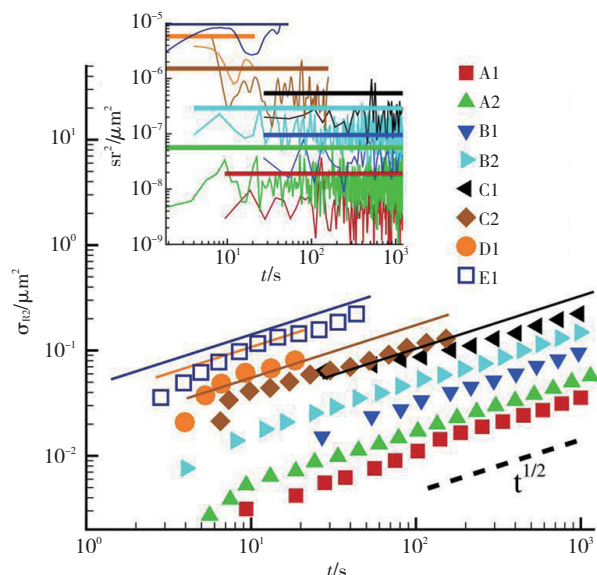


图2 直接数值模拟计算的液滴半径的均方根 σ_{R2} 随模拟时间 t 的变化(A1—E1代表不同的模拟场景,左上图表示在不同模拟场景下模拟和公式计算结果的相关性(sr^2)随时间 t 的变化均符合统计稳定状态)(Gaetano et al., 2015)。

Fig.2 Root mean square of the square droplet radius fluctuations σ_{R2} versus time from simulations and the prediction of the stochastic model. (Inset: in all cases (A1—E1), correlation from simulations and from equation (sr^2) reaches a statistical steady state) (adapted from Gaetano et al., 2015).

2.2 云中湍流对碰并增长的影响

湍流除影响云滴随机凝结外,还可加快云滴相对速度、促进云滴聚集、增加下落速度、提高云滴碰撞效率,进而影响云滴碰并增长,促进云滴谱展宽。在这些方面,研究者通过云微物理模式模拟及观测研究得出了许多有益的结果。

2.2.1 云中湍流对云雨滴碰撞效率的影响

许焕斌(1964)设计了一种测量云雾滴谱分布的仪器。观测时,该仪器吸入含有云雾滴的空气,云雾滴

撞击在采样板上留下印记,连续拍摄采样板的印记可获得每个采样板上液滴的谱分布。通过该仪器观测研究发现,1960年9月衡山层积云中云滴数浓度的波动幅度在30%~100%之间,波动尺度在1~6 m之间,云滴数浓度可能存在很大差异。云滴体积分布也有明显波动,随着采样体积的增加,波动幅度减小。徐华英和李桂枕(1980)研究发现,即使平均液态水含量相同,云滴的谱分布在比较强的波动下也会更宽,这表明滴谱展宽与液态水含量的波动有关。不同大小液滴的数浓度的波动强度也不同:大液滴波动最大,中等液滴波动最小。黄美元等(1965)设计制作了地面云滴谱仪,可以观测周期为0.1~10 s的云雾微结构起伏;利用该仪器在庐山进行了野外观测后发现,在连续少变的层状云中,虽然云滴谱型变化不大,但浓度的起伏还是比较明显,起伏量(均方差与平均值之比)达18%。

林海和顾震潮(1965)通过理论计算云滴增长特征发现,在考虑湍流扩散影响后云滴谱会出现第二个峰值。肖辉等(1988)通过一维非定常积云数值模式计算发现,小尺度湍流中的碰并过程可以加速大云滴的增长,对积云发展前期云滴谱展宽起到很重要的促进作用。在均匀湍流中,小球形粒子在斯托克斯阻力作用下的平均下落速度与静止流体的平均下落速度不同(Maxey, 1987; Wang and Maxey, 1993)。惯性粒子倾向于在低涡度和高速度变率的区域聚集(Maxey, 1987; Shaw et al., 2002)。碰撞效率对云滴的相对速度很敏感,在云中,这种效率不仅要考虑粒子下落速度,而且还要考虑湍流加速度引起的相对速度(Pinsky et al., 1999)。Pinsky 和 Khain(1998)发现云中湍流使液相和冰相粒子之间的相对速度显著增大,明显增加了大的冰相粒子的生成速度,并显著提高了结凇增长速率。Seifert 等(2010)利用湍流碰撞模型对小积云进行了大涡模拟,发现湍流增加了降水量,该现象在耗散率更高的云顶附近最为明显,并且发现云中液态水的含量与局部耗散率相关。Hoffmann 等(2017)使用拉格朗日云模型发现,当考虑湍流引起的碰撞增强时,无论是否存在其他滴谱展宽机制,都很容易形成雨滴。Falkovich 等(2002)推导出了计算小粒子在湍流中的碰撞速率的方程,并研究得出大气湍流能够加快大云滴和雨滴生长速度,并显著减少小雨滴产生的时间;当湍流耗散率为 $0.29 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 时,在湍流的影响下,粒子碰撞相互作用10 min后,雨滴的数浓度从每立方厘米0.64个增加到了1.06个。Hyunho 等(2015)利用二维分档微物理动力模式,通过改变云凝结核(CCN)数浓度,研究了湍流引起的碰撞增强(TICE)对暖云和降水的影响后发现,

由TICE引起的液水路径和地面降水量的变化取决于CCN的浓度。在高CCN浓度环境下,TICE使得暖云平均云滴数浓度减小,平均有效半径增加,进而使地面降水量增加。但在低CCN浓度环境下,TICE的作用使暖云的平均云滴数浓度和平均有效半径的变化很小。Siebert等(2015)、Risius等(2015)在德国阿尔卑斯山祖格斯皮茨山顶附近海拔为2 650 m的站点上,利用安装在距楼顶1.80 m和2.55 m高度的三维超声风速仪、温度计、粒子体积测量仪(PVM-100A)、粒子表面积测量仪等设备对几次暖云过程的云中湍流及云微

物理特性进行观测后发现,云中湍流的泰勒微尺度雷诺数高达 10^4 ,湍流有各向同性的特征,云液态水含量为 $1\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,云滴谱分布为典型的大陆型,云中有时会因湍流混合或碰并生长产生大粒径的云滴;通过云滴数浓度和直径的波动发现云滴很有可能是不均匀混合(图3)。Chen等(2020)研究发现,湍流和吸湿性云凝结核对大液滴的形成非常关键,湍流通过加速小滴的碰撞来维持大滴的形成。通过湍流碰撞的雨滴谱展宽是显著的,因此比在非湍流情况下产生更高的自转换率。

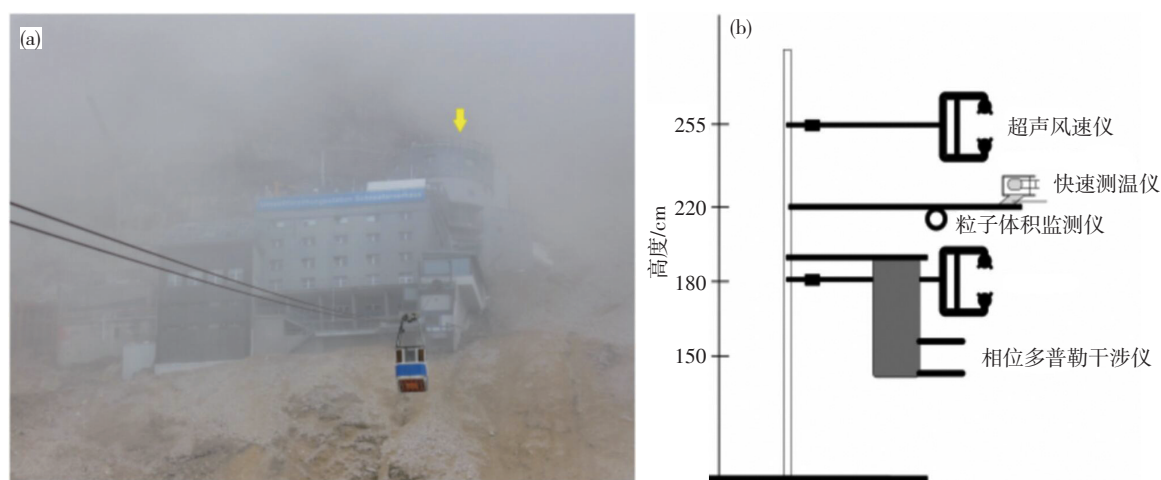


图3 观测站及其主要观测设备示意图(a为大部被云覆盖的观测站,b为观测设备布局)(Siebert et al., 2015)

Fig.3 Schematic diagram of the observation station and its observation equipment (a:The picture shows the UFS partly immersed in clouds.b:The observation equipment layout diagram)(adapted from Siebert et al.,2015).

2.2.2 不同强度湍流对云降水的影响

Franklin(2014)利用包含湍流对云滴碰撞率影响的双矩暖雨方案的大涡模式模拟了层积云和弱对流发现,在弱对流中,湍流对云滴碰撞率的作用对模拟降水率的影响更大,云水向雨水的转化更快。Pinsky和Khain(2002, 2007)发现,湍流环境中碰撞核的增加是大云滴和雨滴形成速度加快的重要因素;在研究了高雷诺数对流体加速度的影响后发现,湍流耗散率在 $2\times 10^{-2}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-3}$ 下,半径大于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的液滴的碰撞效率可提高25%~40%,在 $0.1\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-3}$ 下,碰撞效率可提高2.5~3倍。Grabowski和Wang(2009)通过带有绝热上升模块的数值模式,研究了湍流对降水触发的影响,结果表明,在典型的大陆和海洋云条件下,湍流效应可以使降水的触发时间缩短25%~40%。Paloma等(2018)利用云凝结核计数器、微波辐射计、云雷达和激光雷达综合观测发现,湍流峰值在陆地云的云底和海洋云的云顶;在弱湍流条件下,降水敏感性的值为正,这与气溶胶抑制降水形成的原理相一致,而在较强湍流的环境下,降水敏感性的值较小,也可以为负;在类似的宏

观物理条件下,特别是对于中到高的液态水含量(LWP),高(低)湍流可能会降低(促进)高CCN浓度对降水的抑制作用。Hsieh等(2009)利用飞机观测资料分析了两块云的滴谱演变特征后发现,湍流使云滴向雨滴的转换率分别增加了1.82倍和1.24倍。Franklin(2008)发现当湍流耗散率在 $10^{-2}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-3}$ 时,半径大于 $40\text{ }\mu\text{m}$ 的云滴质量在20 min后增长了21.4%,这表明雨滴形成的速度明显加快,并且这种加速随着湍流耗散率的增加而增加。Guo等(2015)根据西太平洋上空飞机观测资料,估算了156个深对流云的夹卷率,并研究了夹卷率的概率密度函数、夹卷率与云微物理之间的关系,结果表明,用对数正态函数和Weibull分布可以很好地拟合夹卷率的概率密度函数,决定系数分别为0.82、0.85和0.80;夹卷会降低云中的温度、水汽含量和湿静力能;分析夹卷率与微观物理性质的关系发现体积平均半径与夹卷率呈负相关。袁正旋等(2017)利用杭瑞高速洞庭湖大桥测风塔上的三维超声风速仪观测分析了2016年7月3—5日湖南岳阳一次大暴雨过程的近地层湍流特征,发现风速、湍流强度、湍流动能在大

暴雨过程中出现异常偏大;强降水来临前与结束前,湍流功率谱密度出现异常偏大;大暴雨过程中的湍流功率谱密度减小,湍流功率谱密度最大值的频率左移。Zheng等(2022)利用美国能源部大气辐射测量项目(ARM)的KAZR(Ka-Band Zenith Radar)和激光雷达观测研究了北大西洋东部海洋的环境变量对气溶胶-云相互作用的影响,发现边界层湍流强度在气溶胶-云相互作用中起着更重要的作用。

3 我国云降水物理特征观测研究进展

我国利用飞机搭载的PMS(Particle Measuring Systems)、DMT(Droplet Measurement Technologies)及SPEC(Stratton Park Engineering Company)等云物理探测系统对不同类型降水云的宏、微观物理特性及降水机制进行了大量研究(刘思瑶等,2021;郭学良等,2021;张微等,2020)。Zhao等(2018)利用河北2015年9月6架次的飞机观测资料研究发现,当云液态水含量(LWC)恒定时,云滴有效半径随气溶胶浓度的增加而减小。在气溶胶浓度较高时,云滴谱较窄。Chang等(2019)通过飞机观测发现,青藏高原夏季发展阶段的积云小云滴(直径 $2\sim 50\text{ }\mu\text{m}$)数浓度约每立方厘米10个,比大陆其他地区和海洋地区低约1~2个数量级,大云滴(直径 $>50\text{ }\mu\text{m}$)数浓度约每立方厘米 10^{-3} 个,也低于其他地区;云滴谱比其他地区要宽很多,说明高原上的积云比其他地区更容易形成降水。Li等(2019)对山西省气溶胶和云进行了飞机观测,2013年5月的6次飞机观测发现,气溶胶粒子有效直径大多小于 $1\text{ }\mu\text{m}$,数浓度随高度的增加而减小。暖云的云滴数浓度的最大值和平均值分别为每立方厘米147~311个和51~157个。最大粒子直径和平均粒子直径范围分别为 $13.5\sim 28.9\text{ }\mu\text{m}$ 和 $5.8\sim 13.1\text{ }\mu\text{m}$ 。暖云的平均LWC为 $0.05\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。气溶胶与云滴数浓度在垂直和水平方向上均呈负相关。在高气溶胶环境下,云滴越小,数浓度越高;在低气溶胶环境下,出现少量的大云滴。LWC不变时,云滴数浓度和粒子直径呈负相关。LWC增加时云滴大小也增大。双峰型对数正态分布函数可以很好的拟合暖云的平均云滴谱。Wang等(2021)利用雷达、卫星和雨滴谱仪在中国首次观测到了飞机播撒的碘化银催化剂对云顶温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过冷层云产生明显催化效果的定量证据。催化后18 min出现雷达回波,随后出现明显的冰晶催化轨迹。播种后40 min雷达回波下降到地表。地面雨滴谱仪观测到的催化云产生的雨滴最大直径达 2.75 mm ,而降水过程的雨滴最大直径为 1 mm 。催化后100 min内可观测到地面降水的增强。Wei等(2021)对2018年8月5日河北

保定的一次飞机观测研究后发现,在积云中,大多数云粒子的直径在 $7\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 之间,而在层云中,大多数云粒子的直径不超过 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。云滴有效半径与云中行星边界层(PBL)及PBL上层的气溶胶数浓度呈负相关。在 1500 m 以上的高液态水含量区域,云滴数浓度变化不大,气溶胶数浓度含量降低。高雷达反射率对应大的快速云滴探头(FCDP)测得的粒子数浓度和小的气溶胶粒子数浓度;积云中的强上升气流使得云滴的峰值半径和数浓度增加,并拓宽了云滴谱;较低的气温促进了粒子的凝结增长,并产生较大的液滴。Dong等(2020)通过飞机观测研究了过冷云在催化前后的差异,结果表明,在催化之前,目标云是过冷的液相云;催化后,云中出现大冰晶粒子且粒径谱变宽。国内研究者通过飞机观测,在云降水物理特征及气溶胶和云相互作用等方面得到了许多有益的成果,但在利用飞机机载设备观测云中湍流方面还未见相关研究成果。

4 总结及展望

本文介绍了云中湍流的多尺度性质,湍流功率谱表现出 $-5/3$ 的幂律;湍流强度具有空间各向异性的特点,其因云的类型和生命期的不同而有很大的不同。云中湍流会促进液滴的凝结增长,湍流速度场可使液滴轨迹与过饱和度之间存在相关性,从而提高了液滴增长速率,并使滴谱迅速扩展,滴谱拓宽速度随湍流雷诺数的增加而增大。云滴在湍流流场高涡度区域有较快的增长速率,一些云滴的增长速率大于经典凝结增长理论的预测,云滴谱拓宽速度随湍流雷诺数的增加而增大。湍流不均匀性、夹卷和云底上方CCN的活化,为云中液滴创造了良好的生长环境,可提高云滴碰并效率,促进滴谱展宽。

湍流云中的云滴增长问题涉及到云动力学和云微观物理之间的多尺度相互作用,数值模拟是研究该问题的重要手段之一,模拟云中湍流的模型是基于湍流和云降水相关的动力、物理等过程建立起来的数学物理模型(包括动力学方程组和参数化方案)。随着数学模型、计算技术的发展,能够模拟的时空分辨率也逐渐提高,物理过程也越来越精细,模拟效果不断增强;因此利用现在强大的模拟计算能力,利用具有高空间分辨率、分档云微物理过程参数化方案、CCN活化或失活过程参数化等功能的云模式模拟湍流对云过程的影响,研究湍流影响下的云、雨滴谱的演变特征、云滴向雨滴的转换率、暖雨触发时间和净降水率等,将有助于更好理解云动力学过程,增进对云微物理过程的认识,对完善湍流-云微物理相互作用理论非常重要。

另外,自然云中的真实状况还需要观测事实的支撑。飞机观测云中湍流的优势为可直接飞入目标云中对云的不同位置开展观测;但因飞机较快飞行速度及机翼和螺旋桨对空气的扰动对湍流观测数据有很大影响,后期数据校正处理有一定难度。雷达遥感理论上可反演获得高时间分辨率的云微物理和动力参数(包括湍流),我国脉冲云雷达得到了长足发展,在云降水物理、人工影响天气等领域越来越受到重视(刘黎平,2021),但反演精度因云宏微观特性、算法及反演数学物理模型的不同而不同,结果不能够量化且准确性尚未得到证明,任何一种云遥感反演方法都有其相对优势和不足,现有遥感反演技术尚需进一步完善和改进(赵传峰和杨以坤,2021)。在高山或高塔上安装三维超声风速仪等设备开展云中湍流的原位观测,其优势是可以进行连续观测,并可获得高时间分辨率(20~100 Hz)的数据,观测成本较低;但不足的是对观测站点的环境依赖很大,且只能观测云中下部的湍流特征。因此,未来采用多手段、多设备协同观测得到的云中湍流研究成果将对开展云室中湍流-云微物理相互作用方面研究具有重要的参考价值,而且对于揭示大范围空间和时间尺度上的湍流-云复杂相互作用具有重要意义,进而有助于优化数值天气预报和全球气候模型中云参数化方案。

参考文献(References):

- 陈柏纬,李卓民,黄锦鸿.2008.多普勒天气雷达谱宽数据监测机场湍流强度的可行性初探[J].暴雨灾害,27(1):54-58. Chen B W, Li Z M, Huang J H. 2008. Initial study of the feasibility of using spectrum width data from the terminal doppler weather radar to monitor turbulence intensity over the airport [J]. *Torrential Rain and Disasters*,27(1): 54-58 (in Chinese)
- 顾震潮.1962.论近年来云雾滴谱形成理论的研究[J].气象学报,32(4): 267-284. Gu Z C.1962. Recent investigations in the theory of the formation of the cloud-drop spectra [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,32(4): 267-284 (in Chinese)
- 顾震潮,詹麗珊.1962.起伏条件下云雾的重力碰并生长[J].气象学报,32(4):301-307. Gu Z C, Zhan L N. 1962. On the growth of the droplets under gravitational coalescence in a fluctuating environment [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,32(4):301-307 (in Chinese)
- 郭学良,付丹红,郭欣,等.2021.我国云降水物理飞机观测研究进展[J].应用气象学报,32(6):641-652. Guo X L, Fu D H, Guo X, et al. 2021. Advances in aircraft measurements of clouds and precipitation in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*,32(6):641-652 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20210601
- 黄美元,洪钟祥,熊尚清.1965.地面连续云滴谱[J].气象学报,35(2): 257-262. Huang M Y, Hong Z X, Xiong S Q. 1965. A ground continuous cloud-droplet sampler [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,35(2): 257-262 (in Chinese)
- 黄兴友,陆琳,洪滔,等.2020.利用毫米波云雷达数据反演层云微物理参数和云内湍流耗散率[J].大气科学学报,43(5):908-916. Huang X Y, Lu L, Hong T, et al. 2020. A case study on the retrieval of microphysical parameters and in-cloud stratus turbulent dissipation rate by millimeter-wave cloud radar measurement [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*,43(5):908-916 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2018 0203003
- 林海,顾震潮.1965.云滴谱中第二极大形成的初步解释[J].科学通报,10: 923-925. Lin H, Gu Z C. 1965. Preliminary explanation of the second maximum formation in the cloud droplet spectrum [J]. *Chinese Science Bulletin*,10:923-925 (in Chinese)
- 陆春松,徐晓齐.2021.云中夹卷混合过程的研究进展[J].暴雨灾害,40(3): 271-279. Lu C S, Xu X Q. 2021. Advances in the studies of cloud entrainment and mixing process [J]. *Torrential Rain and Disasters*,40(3): 271-279 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.005
- 刘黎平.2021.毫米波云雷达观测和反演云降水微物理及动力参数方法研究进展[J].暴雨灾害,40(3):231-242. Liu L P. 2021. Reviews on retrieval methods for microphysical and dynamic parameters with cloud radar [J]. *Torrential Rain and Disasters*,40(3):231-242 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.002
- 刘思瑶,赵传峰,周毓荃.2021. SPEC 机载云探测系统及其云物理研究进展[J].暴雨灾害,40(3):280-286. Liu S Y, Zhao C F, Zhou Y Q. 2021. SPEC airborne cloud detection system and its cloud physics research progress [J]. *Torrential Rain and Disasters*,40(3):280-286 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.006
- 徐华英,顾震潮.1963.起伏条件下重力碰并造成的暖性薄云降水[J].气象学报,33(1):108-114. Xu H Y, Gu Z C. 1963. On the formation of the precipitation element in a shallow warm-cloud [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,33(1):108-114 (in Chinese)
- 徐华英.1964.垂直气流速度起伏条件下形成降水的各因子分析[J].气象学报,34(3):378-382. Xu H Y. 1964. Analysis of the factors of precipitation under the fluctuation of vertical airflow velocity [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,34(3):378-382 (in Chinese)
- 许焕斌.1964.衡山云雾微结构起伏的初步观测试验[J].气象学报,34(4): 539-547. Xu H B. 1964. Preliminary observation experiment on microstructure fluctuation of Hengshan cloud [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 34(4):539-547 (in Chinese)
- 徐华英,李桂枕.1980.有云泡结构的对流云中降水形成的研究[J].气象学报,38(3):260-268. Xu H Y, Li G Z. 1980. A study on the formation of the precipitation in convective cloud with cell structure [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,38(3):260-268 (in Chinese)
- 肖辉,徐华英,黄美元.1988.积云中云滴谱形成的数值模拟研究(二)-各种碰并过程、大气层结等的作用[J].大气科学,12(3):312-319. Xiao H, Xu H Y, Huang M Y. 1988. Numerical simulation of droplet spectrum formation in cumulus clouds(2)-effects of various collision processes and atmospheric stratification [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,12(3):312-319 (in Chinese)
- 袁正旋,覃军,曾向红,等.2017.湖南岳阳一次大暴雨过程近地层湍流特征分析[J].暴雨灾害,36(5):431-439. Yuan Z X, Qin J, Zeng X H, et al. 2017. Analysis on the turbulence characteristics in near surface layer during a heavy rainstorm event in Yueyang of Hunan [J]. *Torrential Rain and Disasters*,36(5):431-439 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-90 45.2017.05.005

- 周秀骥.1963.暖云降水微观物理机制的统计理论[J].气象学报,33(1): 97–107. Zhou X J. 1963. Statistical theory of microphysical mechanism of warm cloud precipitation [J]. Acta Meteorologica Sinica,33(1): 97–107 (in Chinese)
- 张宏昇.2014.大气湍流基础[M].北京:北京大学出版社:1–7.Zhang H S. 2014. Atmospheric turbulence foundation [M]. Beijing:Peking University Press,1–7(in Chinese)
- 张微,李德泉,刘星光.2020.冷涡前部飞机人工增雨作业条件数值模拟研究[J].沙漠与绿洲气象,14(6):54–60. Zhang W, Li D Q, Liu X G. 2020. Numerical simulation study on artificial precipitation enhancement operation under the background of cold vortex [J]. Desert and Oasis Meteorology, 14(6):54–60 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2020.06.007
- 赵传峰,杨以坤.2021.地基云遥感反演进展及挑战[J].暴雨灾害,40(3): 243–258. Zhao C F, Yang Y K. 2021. Progress and challenges of ground-based cloud remote sensing [J]. Torrential Rain and Disasters, 40(3):243–258 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2021.03.003
- Benmoshe N, Khain A P. 2014. The effects of turbulence on the microphysics of mixed-phase deep convective clouds investigated with a 2-D cloud model with spectral bin microphysics [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 119:207–221. doi:10.1002/2013JD020118
- Boutle I A, Abel S J. 2012. Microphysical controls on the stratocumulus topped boundary-layer structure during VOCALS-Rex [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 12:2849–2863. doi:10.5194/acp-12-2849–2012
- Brenguier J L, Chaumat L. 2001. Droplet spectra broadening in cumulus clouds. Part I: Broadening in adiabatic cores [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 58:628–641. doi:10.1175/1520–0469(2001)058<0628:DSBICC>2.0.CO;2
- Celani A, Falkovich G, Mazzino A, et al.2005. Droplet condensation in turbulent flows [J]. Europhysics Letters, 70:775–781. doi:10.1209/epl/i2005–10040–4
- Chang Y, Guo X, Tang J, et al.2019. Aircraft measurement campaign on summer cloud microphysical properties over the Tibetan Plateau [J]. Scientific Reports, 9(1):4912. doi:10.1038/s41598–019–41514–5
- Chen S, Xue L, Kong M Y. 2020. Impact of aerosols and turbulence on cloud droplet growth: an in-cloud seeding case study using a parcel–DNS (direct numerical simulation) approach [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 20:10111–10124. doi:10.5194/acp-20–10111–2020
- Devenish B J, Bartello P, Brenguier J L, et al. 2012. Droplet growth in warm turbulent clouds [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 138:1401–1429. doi:10.1002/qj.1897
- Dmitriev V K, Kapitanova T P, Litvinova V D, et al. 1984. Mean and microscale structure of wind and temperature fields in jet stream cirrus [C]. In: Proceedings of Ninth International Conference on Cloud Physics, 2:347–350
- Dong X, Zhao C, Yang Y, et al. 2020. Distinct change of supercooled liquid cloud properties by aerosols from an aircraft-based seeding experiment [J]. Earth and Space Science, 7:1–11. doi:10.1029/2020EA001196
- Eames. 2008. Settling of particles beneath water waves [J]. Journal of Physical Oceanography, 38:2846–2853. doi:10.1175/2008JPO3793.1
- Falkovich G, Fouxon A, Stepanov M G.2002. Acceleration of rain initiation by cloud turbulence [J]. Nature, 419:151–154. doi.org/10.1038/nature00983
- Franklin C N. 2008. A warm rain microphysics parameterization that includes the effect of turbulence [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 65:795–815. doi:10.1175/2007jas2556.1
- Franklin C N. 2014. The effects of turbulent collision–coalescence on precipitation formation and precipitation dynamical feedbacks in simulations of stratocumulus and shallow cumulus convection [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 14:6557–6570. doi:10.5194/acp14–65–57–2014
- Gaetano S, Francesco P, Brand L, et al. 2015. Continuous growth of droplet size variance due to condensation in turbulent clouds [J]. Physical Review Letters, 115(18):1–5. doi:10.1103/PhysRevLett.115.184501
- Grabowski W W, Wang L P. 2009. Diffusional and accretional growth of water drops in a rising adiabatic parcel: effects of the turbulent collision kernel [J]. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions, 9:2335–2353. doi:10.5194/acp-9–2335–2009
- Guo X H, Lu C S, Zhao T L, et al. 2015. An observational study of entrainment rate in deep convection [J]. Atmosphere, 2015, 6:1362–1376. doi: 10.3390/atmos6091362
- Hoffmann F, Noh Y, Raasch S. 2017. The route to raindrop formation in a shallow cumulus cloud simulated by a lagrangian cloud model [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 74:2125–2142. doi:10.1175/jas-d-16–0220.1
- Hsieh W C, Jonsson H, Wang L P, et al. 2009. On the representation of droplet coalescence and autoconversion: evaluation using ambient cloud droplet size distributions [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 114:D07201. doi:10.1029/2008JD010502
- Hyunho L, Baik J J, Han J Y, et al. 2015. Effects of turbulence on warm clouds and precipitation with various aerosol concentrations [J]. Atmospheric Research, 153:19–33. doi:10.1016/j.atmosres.2014.07.026
- Kollias P, Albrecht B. 2000. The turbulence structure in a continental stratocumulus cloud from millimeter-wavelength radar observations [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 57:2417–2433. doi:10.1175/1520–0469(2000)057<2417:TTSIAC>2.0.CO;2
- Lanotte A S, Seminara A, Toschi F. 2009. Cloud droplet growth by condensation in homogeneous isotropic turbulence [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 66:1685–1697. doi:10.1175/2008JAS2864.1
- Lau K M, Wu H T.2003. Warm rain processes over tropical oceans and climate implications [J]. Geophysical Research Letters, 30:2290–2294. doi:10.1029/2003GL018567
- Li J, Li P, Ren G, et al. 2019. Aircraft measurements of aerosol distribution, warm cloud microphysical properties, and their relationship over the Eastern Loess Plateau in China [J]. Chemical and Physical Meteorology, 71(1):1–17. doi:10.1080/16000889.2019.1663994
- Lu C S, Liu Y G, Niu S J, et al.2018. Broadening of cloud droplet size distributions and warm rain initiation associated with turbulence: an overview [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 11(2):123–135. doi: 10.1080/16742834.2018.1410057
- Matthew J B, Jacob P F, Raymond A S, et al. 2015. Holographic measurements of inhomogeneous cloud mixing at the centimeter scale [J]. Science, 350:87–90. doi:10.1126/science.aab0751
- Maxey M R.1987. The Gravitational settling of aerosol particles in homogeneous turbulence and random flow fields [J]. Journal of Fluid Mechanics, 174:441–465. doi:10.1017/S0022112087000193
- Mazin I P, Silaeva V I, Strunin M A. 1984. Turbulent fluctuations of horizontal and vertical wind velocity components in various cloud forms [J].

- Atmospheric Oceanic Physics,20:6–11
- Paloma B, Edward P L, Pavlos K, et al. 2018. Relationship between Turbulence and Drizzle in Continental and Marine Low Stratiform Clouds [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,1:4139–4147. doi:10.1175/jas-d-18-0060.1
- Parameswaran K, Sunil Kumar S V, Krishna Murthy B V. 2003. Lidar observations of cirrus cloud near the tropical tropopause: temporal variations and association with tropospheric turbulence [J]. *Atmospheric Research*,69:29–49. doi:10.1016/j.atmosres.2003.08.002
- Pinsky M B, Khain A P.1998. Some effects of cloud turbulence on water–ice and ice–ice collisions [J]. *Atmospheric Research*, 48:69–86
- Pinsky M B, Khain A, Shapiro M. 1999. Collisions of small drops in a turbulent flow part I:collision efficiency. Problem Formulation and Preliminary Results [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,56:2585–2600. doi:10.1175/1520-0469(1999)056<2585:COCDIA>2.0.CO;2
- Pinsky M B, Khain A P. 2002. Effects of in cloud nucleation and turbulence on droplet spectrum formation in cumulus clouds [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,128:501–533. doi:10.1256/003590002321042072
- Pinsky M B, Khain A P. 2007. Collisions of cloud droplets in a turbulent flow.part IV: droplet hydrodynamic interaction [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,64:2462–2482. doi:10.1175/JAS3952.1
- Quante M, Brown P R.1992. Turbulence characteristics of different types of cirrus clouds [C]. In: *Proceedings of First International Conference on Clouds and Precipitation*,1:510–513
- Risius S, Xu H, Lorenzo F D, et al. 2015. Schneefernerhaus as a mountain research station for clouds and turbulence [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*,8:3209–3218. doi:10.5194/amt-8-3209-2015
- Rosa B, Parishani H, Ayala O, et al. 2013. Kinematic and dynamic collision statistics of cloud droplets from high–resolution simulations [J]. *New Journal of Physics*,15:45032. doi:10.1088/1367-2630/15/4/045032
- Seifert A, Nuijens L, Stevens B. 2010. Turbulence effects on warm–rain autoconversion in precipitating shallow convection [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,136:1753–1762. doi:10.1002/qj.684
- Shaw R A, Kostinski A B, Larsen M L. 2002. Towards quantifying droplet clustering in clouds [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,128:1043–1057. doi:10.1256/003590002320373193
- Shaw R A, Reade W C, Collins L R, et al. 1998. Preferential concentration of cloud droplets by turbulence: effects on the early evolution of cumulus cloud droplet spectra [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 55:1965–1976. doi:10.1175/1520-0469(1998)055<1965:PCOCDB>2.0.CO;2
- Siebert H, Franke H, Lehmann K, et al. 2006a. Probing fine-scale dynamics and microphysics of clouds with helicopter–borne measurements [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,87: 1727–1738. doi:10.1175/BAMS-87-12-1727
- Siebert H, Gerashchenko S, Gylfason A. 2010. Towards understanding the role of turbulence on droplets in clouds: In situ and laboratory measurements [J]. *Atmospheric Research*,97:426–437. doi:10.1016/j.atmosres.2010.05.007
- Siebert H, Lehmann K, Wendisch M. 2006b. Observations of small scale turbulence and energy dissipation rates in the cloudy boundary layer [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,63:1451–1466. doi:10.1175/jas3687.1
- Siebert H, Shaw R A, Ditas J, et al. 2015. High–resolution measurement of cloud microphysics and turbulence at a mountaintop station [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*,8:3219–3228. doi:10.5194/amt-8-3219-2015
- Smith S, Jonas P. 1996. Observations of turbulence in cirrus clouds [J]. *Atmospheric Research*,43:1–29. doi:10.1016/S0169-8095(96)00002-6
- Spyksma K, Bartello P.2008. Small–scale moist turbulence in numerically generated convective clouds [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65:1967–1978
- Wang L P, Maxey M R. 1993. Settling velocity and concentration distribution of heavy particles in homogeneous isotropic turbulence [J]. *Journal of Fluid Mechanics*,256:27–68. doi:10.1017/s0022112093002708
- Wang J, Yue Z, Rosenfeld D, et al. 2021. The evolution of an AgI cloud–seeding track in central china as seen by a combination of radar, satellite, and disdrometer observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,126(11):33914. doi:10.1029/2020JD033914
- Wei L, Huang M, Zhang R, et al. 2021. Microphysical characteristics of precipitating cumulus cloud based on airborne Ka–band cloud radar and droplet measurements [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 15:1–6. doi:10.1016/J.AOSL.2021.100134
- Weil J C, Lawson R P, Rodi A R. 1989. Relative dispersion of ice crystals in seeded cumuli [J]. *Journal of Applied Meteorology*,32:1055–1073. doi: 10.2307/45405661
- Zhao C, Qiu Y, Dong X, et al. 2018. Negative aerosol–cloud re relationship from aircraft observations over Hebei, China [J]. *Earth and Space Science*,5(1):19–29. doi:10.3390/atmos10010019
- Zheng X J, Dong X Q, Ward D M, et al. 2022. Aerosol–cloud–precipitation interactions in a closed–cell and non–homogenous MBL stratocumulus cloud [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*,39(12):2107–2123. doi: 10.1007/S00376-022-2013-6

(责任编辑 张 文)