

## 基于脉冲数字全息干涉术的云滴谱离散度研究

高阳子, 王骏\*, 唐家斌, 刘晶晶, 闫庆, 华灯鑫

西安理工大学激光雷达遥感研究中心, 陕西 西安 710048

**摘要** 为了研究云滴谱的离散度与云微物理参量之间的相关性,提出了基于现场可编程门阵列的短脉冲调制激光、高分辨率显微光学系统和同轴数字全息干涉术相融合的观测技术,该技术探测云滴粒子的最小尺寸为  $2\ \mu\text{m}$ , 还可以获得完整的云滴谱谱宽数据。在膨胀云室中连续三天的不同气溶胶数浓度下,开展了生消过程中云滴粒子的三维位置与直径的观测,利用观测结果计算了云微物理参量。进一步分析了云滴谱的离散度与云微物理参量在生成与消散过程中的正相关关系。通过比对不同气溶胶数浓度条件下云滴谱离散度的分布情况,得到了随着云滴数浓度的增多,离散度的取值范围会逐渐减小,且离散度相对拟合线的离散性降低的结论。

**关键词** 全息; 数字全息; 脉冲数字全息干涉术; 云滴谱离散度; 云微物理

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0609001

## Dispersion of Cloud Droplet Based on Pulsed Digital Holographic Interferometry

Gao Yangzi, Wang Jun\*, Tang Jiabin, Liu Jingjing, Yan Qing, Hua Dengxin

School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,  
Xi'an, Shaanxi 710048, China

**Abstract** In order to study the correlation between cloud droplet spectrum dispersion and cloud microphysical parameters, an observation technique based on short pulse modulated laser based on field programmable gate array, high resolution microscopic optical system, and coaxial digital holographic interferometry is proposed. The minimum size of cloud droplet detected by proposed technique is  $2\ \mu\text{m}$ , and the complete spectrum width data of cloud droplet can be obtained. Under different aerosol concentrations for three consecutive days in an expanding cloud chamber, the three-dimensional positions and diameters of cloud droplets during the generation and elimination process are observed, and the cloud microphysical parameters are calculated by using the observation results. Furthermore, the positive correlation between the dispersion of cloud droplet spectrum and cloud microphysical parameters in the process of generation and dissipation is analyzed. By comparing the dispersion distribution of cloud droplet spectrum under different aerosol number concentrations, it is concluded that with the increase of cloud droplet concentration, the value range of the dispersion will gradually decrease, and the dispersion will decrease relative to the fitting line.

**Key words** holography; digital holography; pulsed digital holography interferometry; dispersion of cloud droplet spectrum; cloud microphysics

## 1 引言

云降水是大气水循环的重要过程之一,对天气、

气候、人工影响天气和大气化学都有着重要的影响。云与降水相互影响机制是天气和气候模式中最不确定的因子之一,主要原因是对其认识不充分,将理论

收稿日期: 2021-11-15; 修回日期: 2021-12-17; 录用日期: 2021-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(41875034, 52127802)

通信作者: \*wangjun790102@xaut.edu.cn

仿真模型代入模式中会忽略部分实际情况,而现有的参数化方案中假设参数过多,不足以描述云降水的关键过程,特别是云微物理过程。其中,云滴谱的离散度对于参数化方案的研究起着非常重要的作用<sup>[1-4]</sup>。在数值模式中,离散度会影响云滴粒子的有效半径,从而影响云的光学厚度并改变云直接反射的太阳辐射总量,进而影响云的光学特征。目前,国内外观测云微物理参量的主要仪器为陆基或机载的基于光散射或成像理论的云滴谱仪<sup>[5-8]</sup>,上述仪器均存在采样频率较低以及不能实现三维测量的瓶颈问题。特别是,机载云滴谱仪的采样频率为 1 Hz,当飞机以 50~100 m/s 的速度前进时,云滴谱仪仅提供 50~100 m 距离内云滴谱的积分效果,在观测精度和尺度上存在的瓶颈使其无法分析云滴谱的精细结构与时空演化规律。因此,受到云微物理参量测量手段的限制,目前云滴谱离散度的参数化方案依然具有极大的不确定性。Martin 等<sup>[9-11]</sup>通过仿真计算得出了云滴数浓度与离散度呈正相关;Ma 等<sup>[12-13]</sup>研究发现云滴数浓度与离散度呈负相关;Zhao 等<sup>[14]</sup>提出了随着云滴数浓度的增加,云滴谱离散度的取值范围会逐渐减小。因此,云微物理参量观测手段所存在的瓶颈极大地限制了离散度与云微物理间相互关系的获得,进而使参数化方案存在不足。

不同于光学全息干涉术,数字全息干涉术(DHI)极大地简化了全息图的记录和处理过程。由于不需要银盐干板的湿处理,故采用 CCD(Charge Coupled Device)或 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor)相机来拍摄数字全息图,因此 DHI 拥有了快速、实时、无损和全场测量的优点<sup>[15-19]</sup>。随着 DHI 的迅速发展,其被视为实时测量动态多参量物理场的潜在技术,在粒子场成像<sup>[20-22]</sup>、红细胞成像<sup>[23]</sup>和超快过程成像<sup>[24]</sup>等科学领域得到了成功的应用。目前,利用 DHI 测量云微物理参数的研究中:Amsler 等<sup>[25]</sup>利用 DHI 在阿尔卑斯山的高海拔研究站进行观测,观测到了从 10  $\mu\text{m}$  到几毫米的云滴谱分布;Fugal 等<sup>[26]</sup>研制了机载与陆基 DHI 成像设备并用于云微物理观测,将设计的设备放在飞机、气象气球和气象塔式上,显著增加了原位云微物理观测的实用性和数据的丰富性;Beals 等<sup>[27]</sup>利用 DHI 研究了云滴谱在夹带和与纯净空气混合的响应,测量结果显示云与空气界面处的响应存在尖锐的转变,局部云滴粒子的尺寸分布在数密度上波动较大,但平均直径几乎不变。然而,在上述研究成果中,云滴粒子的最小探测尺寸为 7.5  $\mu\text{m}$ ,暖

云中云滴粒子的分布区间为 2~100  $\mu\text{m}$ ,由此可知上述方法难以提供完整的云滴谱数据。本文结合基于 FPGA(Field Programmable Gate Array)的短脉冲调制激光、同轴 DHI 和基于 GPU 与 CPU 融合的多线程计算技术,在 BACIC(Beijing Aerosol and Cloud Interaction Chamber)中实现了最小尺寸(粒径为 2  $\mu\text{m}$ )云滴粒子的三维位置与直径的观测,利用上述数据获得了云微物理参量,进一步分析了云滴谱离散度与云微物理参量在生成与消散过程中的关系并获得了它们的相关性。本文的研究成果可为提高对云降水过程的理论认识和参数化方案的开发奠定数据支持,也可为天气、气候、人工影响天气和大气化学等领域的研究提供重要的技术支持。

## 2 基本原理

同轴 DHI 由于具有光路简单和信息密度大的优点,以及在远场条件下记录的粒子孪生像干扰较小的特点,故被广泛应用于三维动态物场的记录与重建。当利用光波照明粒子时,粒子的衍射光与未经调制的直透光形成干涉,利用 CCD 或 CMOS 来记录数字全息图。当测量路径中包含  $n$  个粒子时,根据标量衍射理论,全息图重建平面的强度分布<sup>[28]</sup>可表示为

$$U_R(u, v) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\infty} R(x, y) I_H(x, y) \times \frac{\exp[jk \sqrt{(u-x)^2 + (v-y)^2 + z_R^2}]}{\sqrt{(u-x)^2 + (v-y)^2 + z_R^2}} dx dy, \quad (1)$$

式中:  $(u, v)$  为重建平面坐标;  $(x, y)$  为全息图坐标;  $\lambda$  为激光波长;  $R(x, y)$  为平面参考光波, 值为 1;  $I_H(x, y)$  为干涉条纹的强度;  $k$  为波数;  $z_R$  为重建距离。在重建距离平面上的粒子聚焦且可清晰成像, 其余位置的粒子离焦且成像呈现模糊状态。轮廓边界的本质: 在粒子所处的环境中, 由于边界处的相态不同, 所以复折射率也不同, 因此在同轴 DHI 中重建获得的是粒子的数量、三维空间位置和粒径。

利用同轴 DHI 获得云滴粒子的信息后, 根据云微物理理论, 数浓度  $N_c$ 、平均直径  $D_{MVD}$ 、含水量  $C_{LWC}$  可表示为

$$\begin{cases} N_c = \sum_{i=1}^{k'} n'_i \\ D_{MVD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{k'} d_i \\ C_{LWC} = \frac{4}{3} \pi \rho_w \sum_{i=1}^{k'} r_i^3 \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $n'$  为每档粒子数浓度;  $k'$  为档的个数;  $d$  为单个粒子直径;  $N$  为单位时间内粒子个数;  $r$  为每档半径;  $\rho_w$  为水的质量密度; 下标  $i$  表示数据为第  $i$  档。云滴谱的离散度  $\varepsilon$  表征了云滴粒径的离散程度和粒子谱的展宽程度, 可表示为

$$\varepsilon = \frac{2\sigma}{D_{MVD}}, \quad (3)$$

式中:  $\sigma$  为标准差, 可表示为

$$\sigma = \left[ \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{k'} \left( r_i - \frac{D_{MVD}}{2} \right)^2 n'_i \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

### 3 实验系统

BASIC 膨胀云室的工作方式是在水汽过饱和的前提下持续降低云室内的压强和温度, 将气溶胶作为云凝结核来产生云滴以模拟云雾的产生过程。图 1 展示了云室中利用脉冲 DHI 系统测量云微物理参量的示意图, 其中 ML 为显微镜头。光路中, 利用波长为 532 nm 和重复频率为 10 Hz 的脉冲激光器作为光源, 为了消除全息图中高速运动粒子的拖尾现象, 令脉冲激光的脉宽为 0.15  $\mu\text{s}$ 。为了在不同环境下保证激光的稳定性, 采用 99:1 的分光棱镜将光源分为两部分: 1% 的反射光由 PD

(Photodiode) 接收以测量激光的能量波动情况, 然后反馈给激光器控制电路, 电路利用 PID (Proportion Integration Differentiation) 算法来动态调整激光器的驱动电流; 99% 的透射光经过由三片非球面透镜 (L1~L3) 组成的准直扩束系统后照射到被测云粒子上。粒子的衍射光与未经调制的透射光形成干涉, 经高分辨率、大景深的显微系统放大 (实际放大率为 5.89 倍) 后被 CMOS (最大分辨率为 5120 pixel  $\times$  5120 pixel, 像素尺寸为 2.5  $\mu\text{m} \times$  2.5  $\mu\text{m}$ , 最高采样率为 15 frame/s) 靶面接收。在实验中, 由于脉冲激光的模式质量大大降低和带宽增大, 以及云室中膨胀造云充满整个光路, 因此引入大量噪声。为了提高干涉条纹的对比度, 在显微系统后放置一个偏振片 P。实验中, 采用 CPC (Condensation Particles Counters) 来测量云室中的气溶胶数浓度, 全息系统放在 BASIC 底部的实验平台上。为了只产生液相云滴粒子, BASIC 中只通过降压来实现膨胀造云, 保持温度在 0  $^{\circ}\text{C}$  以上。此外, 利用图 1 的系统来观测云微物理参量, 最终获得的是云滴粒子的三维位置和直径, 根据 (2) 式和 (3) 式可进一步获得云微物理参量, 即云滴谱、数浓度、平均直径、含水量和离散度。

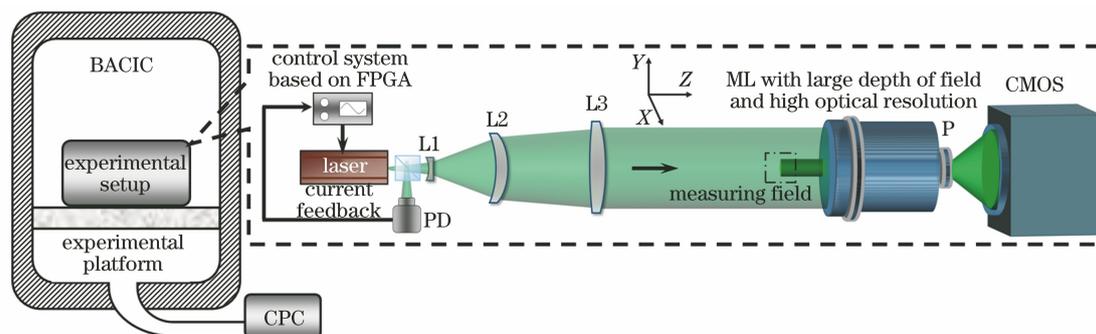


图 1 脉冲 DHI 系统的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for pulsed DHI system

为了验证脉冲 DHI 系统在采样区间内的光学分辨率, 利用图 1 的光路来观测 USAF1951 分辨率板, 沿光束方向 ( $z$  轴) 的采样距离为 12 mm,  $z$  轴的零点设置在显微系统的焦平面上。图 2 展示了  $z$  轴上 -6, 0, 6 mm 位置处的再现图。图 2(a)~2(c) 中最小可分辨的线对标号均为 7-6 (最高标号), 其对应的线宽为 2.19  $\mu\text{m}$ 。

为了验证高浓度粒子 ( $1 \text{ cm}^3$  的空间内有 6000 个粒子) 的条件下球形粒子的粒径识别精度, 利用图 1 的光路来观测标准粒子衍射板, 粒子的标准粒径分别为 2  $\mu\text{m}$  (798 个)、10  $\mu\text{m}$  (225 个) 和 20  $\mu\text{m}$

(36 个)。标准粒径分别为 2  $\mu\text{m}$  和 10  $\mu\text{m}$  的粒子以粒径的 8 倍为间隔组成方形阵列, 标准粒径为 20  $\mu\text{m}$  的粒子的间隔设置为粒径的 12 倍。较小粒子的探测不确定性主要包含三个方面: 由杂散光、非采样区域粒子衍射光和激光器光斑特性引起云滴粒子的成像灰度不均; 光学显微系统的像差; 在粒子识别时使用了腐蚀和膨胀的图像算法, 从而导致 1 pixel 的识别误差。第一条影响因素可以利用标定与多次测量平均来消除。第二条光学显微系统的像差, 可将以光轴为中心的 70% 区域的像差忽略, 剩下 30% 区域的像差主要是场曲和畸变, 利用标准

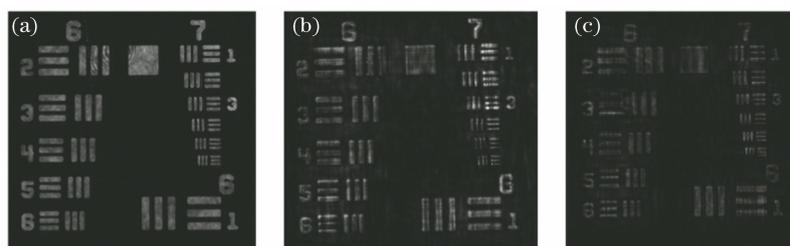


图 2 USAF1951 分辨率板在不同位置处的再现全息图。(a) 0; (b) 6 mm; (c) -6 mm

Fig. 2 Reproducing holograms of USAF1951 resolution plates at different locations. (a) 0; (b) 6 mm; (c) -6 mm

粒子分辨率板多次在这个区域成像, 粒子直径测量的平均不确定度小于 18.3%, 因此将 CMOS 的分辨率降低至  $3200 \text{ pixel} \times 3200 \text{ pixel}$ , 使粒子直径测量的平均不确定度小于 10%, 因此在 X-Y 截面的采样尺寸为  $1.35 \text{ mm} \times 1.35 \text{ mm}$ 。不考虑光学系统的像差, 云滴粒子直径的测量误差理论上应为等效像素的大小。实验系统的光学放大率为 5.89 倍, 相机的像素大小为  $2.5 \mu\text{m}$ , 等效像素为  $0.42 \mu\text{m}$ , 所以经过开闭运算等图像算法处理后, 云滴粒子直径的测量误差为  $\pm 0.42 \mu\text{m}$ 。通过识别算法获得的粒子直径误差实际上小于理论值, 标准粒子衍射板的测量结果也证明了这一点。图 3(a) 展示了  $2 \mu\text{m}$  标准粒子衍射板的数字全息图重建结果及标准粒子

的识别过程。图 3(b) 和图 3(c) 分别为  $10 \mu\text{m}$  和  $20 \mu\text{m}$  标准粒子的识别结果, 识别过程与图 3(a) 一致。图 3(a) 识别了 795 个粒子, 测量平均值为  $2.05 \mu\text{m}$ ; 图 3(b) 识别了 236 个粒子, 测量平均值为  $10.12 \mu\text{m}$ ; 图 3(c) 识别了 36 个粒子, 测量平均值为  $19.89 \mu\text{m}$ 。对于偏差最大的  $20 \mu\text{m}$  粒子, 其真值与平均值的偏差也仅为  $0.11 \mu\text{m}$ , 所以将云滴粒子直径的测量误差认定为理论值 ( $\pm 0.42 \mu\text{m}$ ) 是一种保守的评估方法。此外, 标准粒子衍射板中粒径加工误差为  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。图 3 展示了距离焦平面  $Z = 6 \text{ mm}$  处的标准粒子衍射板的再现图。图 3(a) 识别了 795 个粒子, 测量不确定度为  $(2.05 \pm 0.53) \mu\text{m}$ ; 图 3(b) 识别了 236 个粒子, 测量不确定度为

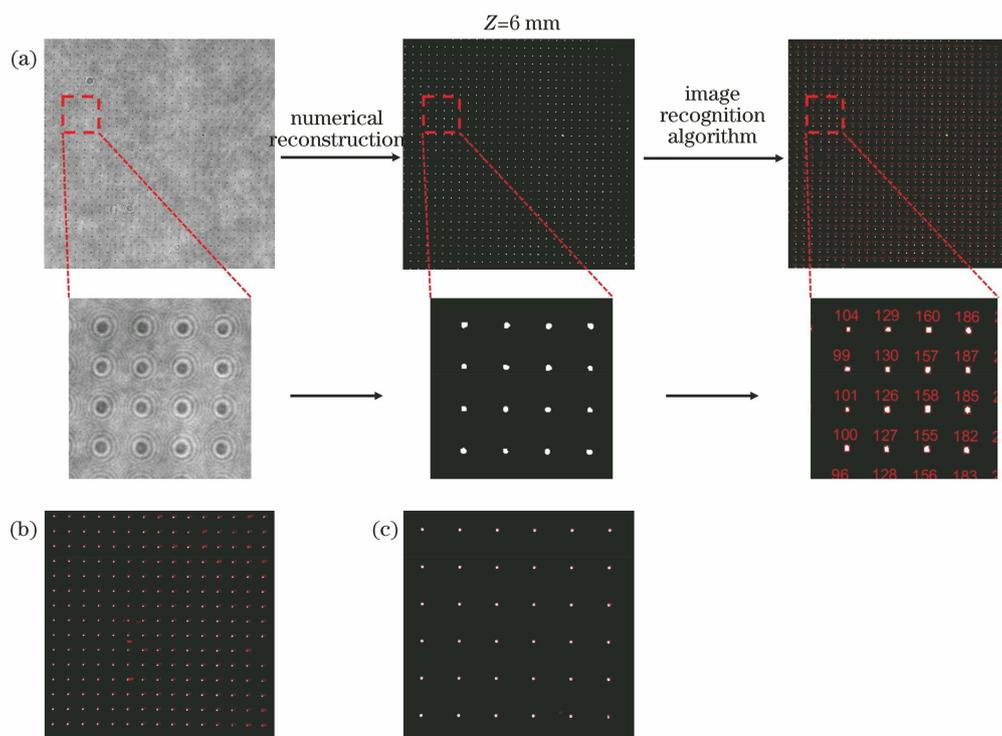


图 3 不同粒子的重建过程和重建结果。(a)  $2 \mu\text{m}$  粒子的重建过程和重建结果;

(b)  $10 \mu\text{m}$  粒子的重建结果; (c)  $20 \mu\text{m}$  粒子的重建结果

Fig. 3 Reconstruction process and results of different particles. (a) Reconstruction process and results of  $2 \mu\text{m}$  particles;

(b) reconstruction results of  $10 \mu\text{m}$  particles; (c) reconstruction results of  $20 \mu\text{m}$  particles

( $10.12 \pm 0.86$ )  $\mu\text{m}$ ; 图 3(c) 识别了 36 个粒子, 测量不确定度为 ( $19.89 \pm 1.24$ )  $\mu\text{m}$ 。结果表明, 不同粒径粒子的综合识别率为 98%。云室中, 脉冲数字全息干涉系统的采样空间内不同粒径的粒子数通常少于 50 个, 自然界中通常少于 10 个, 因此实验中粒子的识别率会更高。此外, 1 pixel 的识别误差存在正负分布, 在计算云微物理参量(含水量、平均半径等)时, 通常将它们取平均值, 因此测量不确定度对云微物理参量的影响比单个云滴粒子小得多。

## 4 结果与讨论

实验中, 压强的下降速率为 65 hPa/min, 温度降低了 9.5 K, 云室内膨胀生云到云消散的过程约持续 5 min。上述实验条件不变, 连续三日各开展一次实验, CPC 测量 1  $\text{cm}^3$  的日均气溶胶数分别为 10390 个、9150 个和 7370 个。脉冲 DHI 系统的

采样频率设置为 10 Hz, CMOS 的曝光时间为 10  $\mu\text{s}$ 。图 4 展示了数字全息图的分层重建及云滴粒子的识别过程。根据大气物理理论, 暖云云滴被认为是球形液相粒子。在云室中, 当利用 DHI 观测云滴粒子时, 全息图中获得的是球形粒子在 CMOS 靶面上的干涉图像。利用卷积法进行数值重建, 将  $-6 \sim 6$  mm 的再现区间划分为 35 份, 重建出 35 张再现图。对每张再现图按照 0.4 的阈值进行二值化, 获得二值化图像。对二值化图像进行一次开运算和一次闭运算, 可将粒子的边缘平滑闭合。此时部分粒子内部出现空洞, 再使用填洞算法将内部空洞置 1。对获得的完整粒子进行贴标签, 获得每个粒子包含像素的外轮廓。最后利用识别算法获得长短轴尺寸, 短轴尺寸即为云滴粒子的直径。经过粒子识别后, 获得粒子的 X、Y 和 Z 轴坐标。

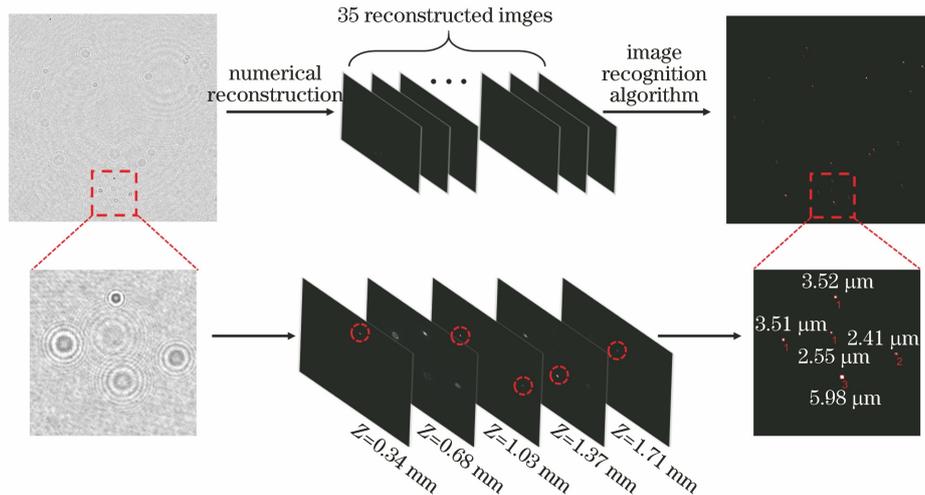


图 4 数字全息图的分层重建与云滴粒子的识别过程

Fig. 4 Process of layered reconstruction of digital hologram and recognition process of cloud droplets

为了验证脉冲 DHI 系统观测云滴粒子直径的准确性, 实验中采用商用雾滴谱仪 FM-120 来测量, 该设备采用吸入粒子的方式, 根据粒子的光散射原理来获得粒径, 采样频率为 1 Hz。该设备在云滴粒子直径的测量精度方面得到研究者的认同, 但存在吸入的粒子破坏原有的粒子分布、大粒子的测量误差较大和被测粒子丢失严重的问题。因此, 在云室实验中主要对比两者的云滴粒子  $D_{\text{MVD}}$  值, 如图 5 所示。从图 5 可以看到, 在 1 min 内两台设备测量得到  $D_{\text{MVD}}$  的变化趋势符合较好。

在云室或自然界中, 云中的风速通常为 1~10 m/s, 脉冲 DHI 系统的采样频率为 10 Hz, 因此每两张数字全息图的采样间隔为 0.1 s。由于风的作用会将第一张数字全息图记录的云滴粒子在下一

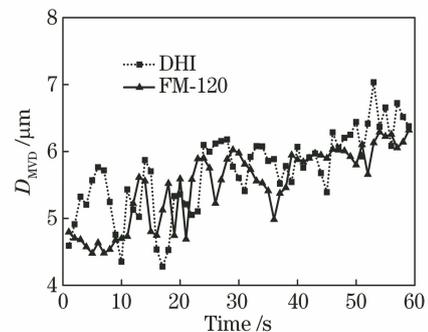


图 5 DHI 与 FM-120 的  $D_{\text{MVD}}$  观测结果对比

Fig. 5 Comparison of  $D_{\text{MVD}}$  observation results of DHI and FM-120

次记录时移出采样区域, 因此相当于脉冲 DHI 系统在 1 s 内移动了 10 个位置来测量云滴粒子。由于

需要将实验结果与 FM-120 雾滴谱仪的测量结果进行对比,以及进行泰勒冻结假设,利用时间积累法将 10 次测量的云滴粒子结果合成为 1 s 的结果,最终获得图 6 的云滴粒子三维空间分布图。

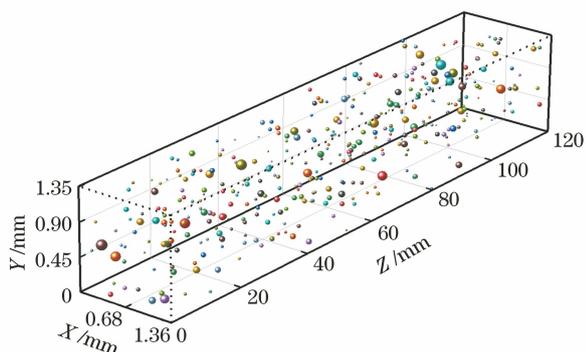


图 6 第一次实验中第 3 min 的云滴粒子三维分布

Fig. 6 Three-dimensional distribution of cloud droplets in 3<sup>rd</sup> min in first experiment

根据云滴粒子的直径分布可获得云滴谱,图 7 展示了三次实验中不同时刻的云滴谱分布。为了便

于数据分析,将云滴谱按尺寸分为三档,即 A 档、B 档和 C 档,如图 7(d)所示。在图 7(a)~7(c)所展示的第 1 次实验中,三个时刻下 B 档的中值都为 5.5  $\mu\text{m}$ ,A 档的粒子数平均占比(45.5%)高于 C 档的粒子数平均占比(27.6%),这是由于气溶胶数浓度高,所以云凝结核多,故其平均水汽吸收量低,即小云滴多且长大困难。在图 7(d)~7(f)所展示的第 2 次实验中,相比第 1 次实验的气溶胶数浓度降低了 11.9%,B 档的中值增长到 6.5  $\mu\text{m}$ ,A 档和 C 档的粒子数平均占比接近。在图 7(g)~7(i)所展示的第 3 次实验中,气溶胶数浓度又降低 19.4%,B 档的中值保持 6.5  $\mu\text{m}$ ,然而 A 档的粒子数平均占比(21.3%)低于 C 档的粒子数平均占比(54.8%)。连续三次的实验结果表明,气溶胶数浓度的降低会导致云滴谱谱形右移,A 档的粒子数平均占比逐渐下降,原因在于云凝结核的竞争增长随着数浓度的减少而弱化,从而导致整个云滴粒子的粒径增大。

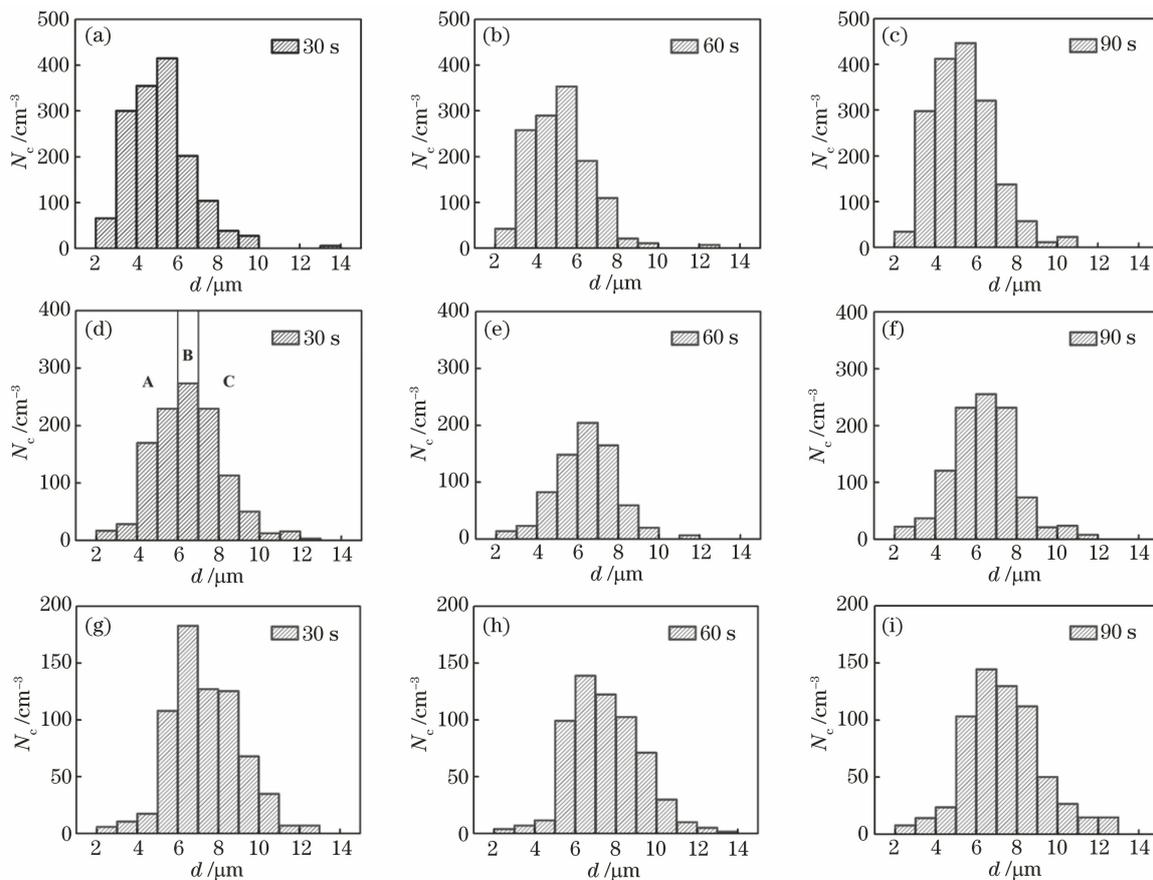


图 7 三次实验中不同时刻的云滴谱分布。第一次实验,(a) 30 s,(b) 60 s 和(c) 90 s;第二次实验,(d) 30 s,(e) 60 s 和(f) 90 s;第三次实验,(g) 30 s,(h) 60 s 和(i) 90 s

Fig. 7 Spectral distribution of cloud droplets at different time in three experiments. 1<sup>st</sup> experiment, (a) 30 s, (b) 60 s, and (c) 90 s; 2<sup>nd</sup> experiment, (d) 30 s, (e) 60 s, and (f) 90 s; 3<sup>rd</sup> experiment, (g) 30 s, (h) 60 s, and (i) 90 s

对每个通道的贡献进行数值统计,结果如图 8 所示。图 8(a)中柱状图的高度代表相应尺寸的数浓度,折线反映了平均直径的变化趋势。从图 8(a)可以看到,整体的数浓度  $N_c$  逐渐降低,但是平均直径却增长缓慢。图 8(b)展示了三种粒子尺寸的占

比情况,其中  $I_{mid}$  为 A 档与 B 档分界粒径大小。从图 8(b)可以看到,偏小粒子占整个尺寸分布的比例在第二天由 45.47% 减少为 38.70%,第三天再降低为 21.26%。因此,统计数据表明偏小粒子的比例与气溶胶数浓度呈正相关。

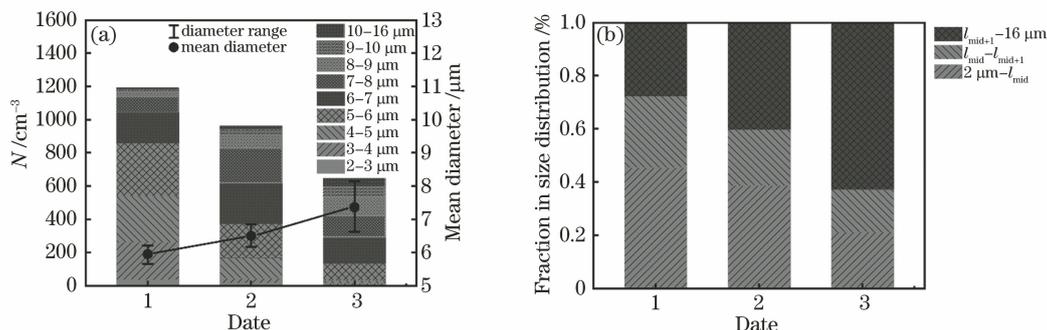


图 8 云滴谱数据的统计结果。(a) 9 个通道的数浓度分布;(b) 三种粒子尺寸的占比情况

Fig. 8 Statistical results of cloud droplet spectrum data. (a) Number concentration distribution of nine channels; (b) proportions of three particle sizes

为了分析云滴谱的离散度与各云微物理参量之间的关系,首先根据(2)式对实验数据进行低通滤波,可获得云滴粒子数浓度  $N_c$ 、平均直径  $D_{MVD}$  和含水量  $C_{LWC}$ ,结果如图 9 所示。在三次实验的 5 min 内,数浓度在前 2.5 min 逐渐上升,随后下降,这反映了整个云滴粒子的生长和消散过程。由于气溶胶数浓度较高,因此平均直径的波动幅值很小,整个过程中上升和下降的趋势微弱。三种气溶胶数浓度下云微物理对比结果显示,气溶胶数浓度

的降低会导致云滴粒子数浓度的降低、平均直径的增加以及含水量的降低。然而,对于  $1 \text{ cm}^3$  的日均气溶胶数浓度(7370 个),含水量出现了快速的增长(2.0~2.7 min)和下降(3.5~4.0 min)过程,如图 9(c)所示。直径为 2~6  $\mu\text{m}$  的云滴粒子比例的减少在很大程度上降低了平均直径的稳定性,在 2.0~3.0 min 的时间内平均直径曲线很快上升,这造成了含水量曲线的陡峭变化。因此,将云滴粒子直径扩展到 2  $\mu\text{m}$  有利于观测云微物理参量的特殊变化。

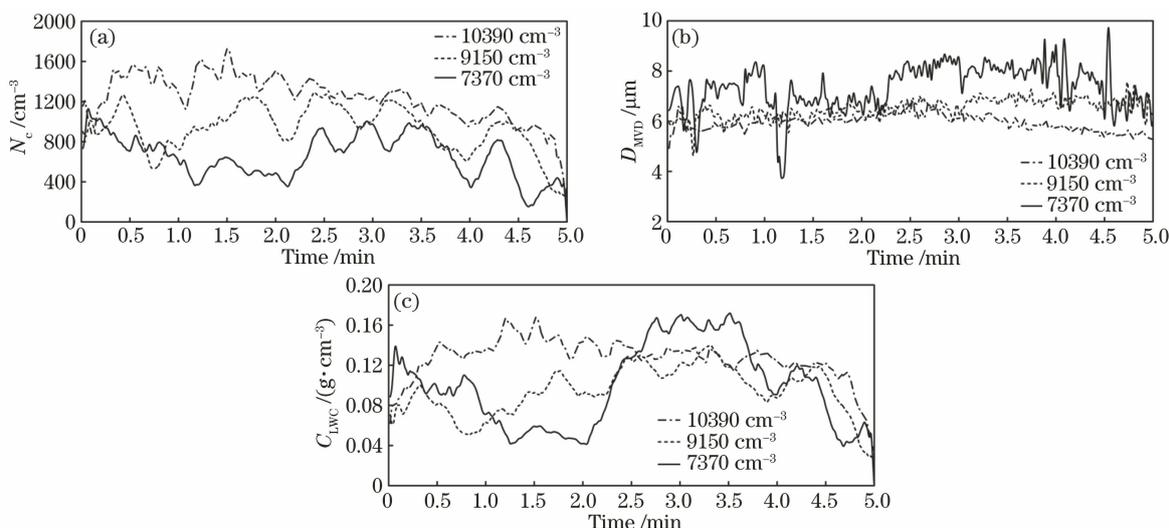


图 9 三次实验中云微物理参量的结果。(a) 数浓度;(b) 平均直径;(c) 含水量

Fig. 9 Results of cloud microphysical parameters in three experiments. (a)  $N_c$ ; (b)  $D_{MVD}$ ; (c)  $C_{LWC}$

根据(3)式可获得云滴谱的离散度,当  $1 \text{ cm}^3$  的气溶胶数为 10390 个时,第 1 min 和第 5 min 的云滴粒子数浓度、平均直径和含水量,以及云滴谱离散

度的变化趋势对比如图 10 所示。云生成阶段,云滴谱离散度的线性拟合线斜率为  $0.0011 \text{ s}^{-1}$ ,图 10(a)~10(c)展示了云滴谱的离散度随着云滴

粒子数浓度、平均直径和含水量的增加而增加。云消散阶段,云滴谱离散度的线性拟合线斜率为  $-0.0062 \text{ s}^{-1}$ ,图 10(d)~10(f)展示了云滴谱的离散度随着云滴粒子数浓度、平均直径和含水量的减小而减小。因此,云滴谱的离散度与云微物理参量呈正相关。图 11 展示了云生成阶段不同气溶胶数

浓度下云滴谱的离散度。从图 11 可以看到,当  $1 \text{ cm}^3$  的气溶胶数分别为 10390 个和 7370 个时,云滴谱离散度的取值范围分别为  $0.172 \sim 0.349$  和  $0.212 \sim 0.591$ ,因此随着云滴数浓度的增多,离散度的取值范围会逐渐减小,且离散度数据相对拟合线的离散性降低。

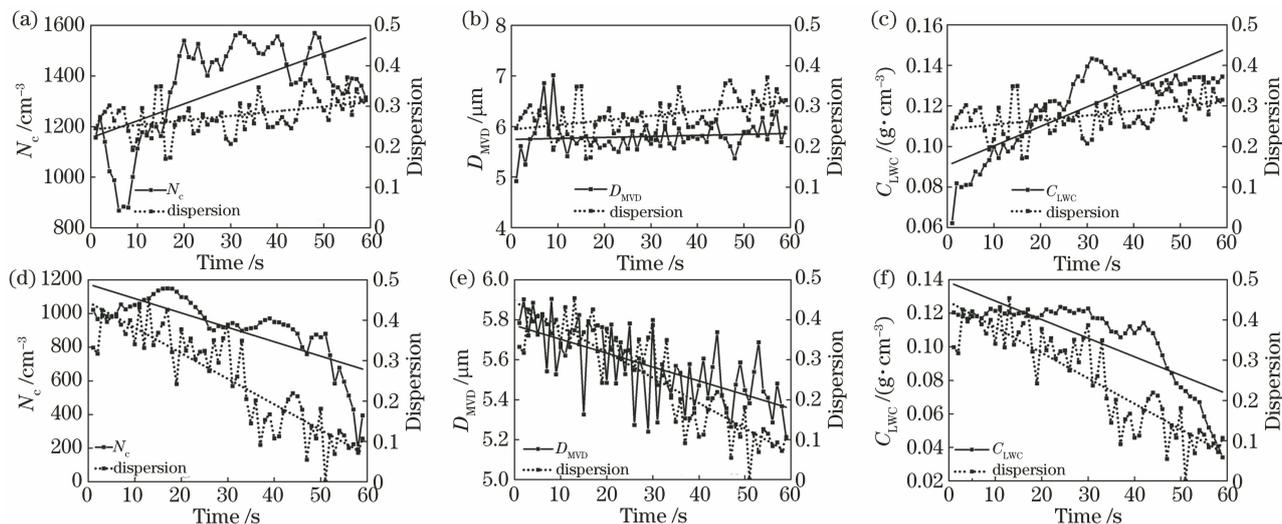


图 10 云微物理参量与离散度对比结果。生成阶段,(a)数浓度与离散度、(b)平均直径与离散度和(c)含水量与离散度;消散阶段,(d)数浓度与离散度、(e)平均直径与离散度和(f)含水量与离散度

Fig. 10 Comparison results of cloud microphysical parameters and dispersion. Generation stage, (a) numerical concentration and dispersion, (b) average diameter and dispersion, and (c) water content and dispersion; dissipation stage, (d) numerical concentration and dispersion, (e) average diameter and dispersion, and (f) water content and dispersion

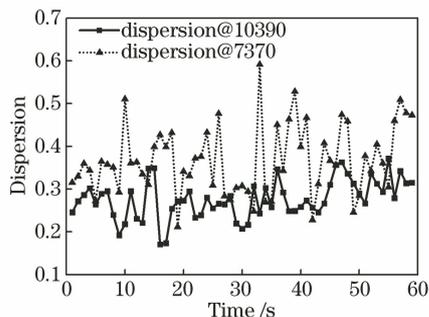


图 11 云生成阶段不同云滴数浓度下云滴谱的离散度曲线  
Fig. 11 Dispersion curve of cloud droplet spectrum under different cloud droplet concentration in stage of cloud formation

## 5 结 论

为了研究云滴谱的离散度与云微物理参量之间的相关性,基于光学衍射与全息干涉理论并结合基于 FPGA 的短脉冲调制激光、高分辨率光学系统和同轴 DHI 技术,测量了粒径  $\geq 2 \mu\text{m}$  的云滴粒子在生消过程中的三维位置与直径,获得了完整的液相云滴谱分布。在 BACIC 连续三天的观测实验中,通

过改变气溶胶数浓度引起云凝结核变化的实验分析并证明了云滴谱的离散度与云微物理参量在生消过程中呈正相关。通过分析云滴谱的离散度分布特征,得到了随着云滴数浓度的增加,离散度的取值范围将减小,且离散度相对拟合线的离散性降低的结论。然而,本文的研究对象为暖云中的云滴粒子,由于粒子识别算法不具备相态识别功能,当云中存在冰晶粒子时的含水量比真实含水量偏大,云滴谱的分布系数也会产生较大偏差。因此,本方法适用于陆基云(雾)微物理的研究以及机载暖云参量的观测,后续相态识别算法的引入可使本方法应用于多种云微物理参量的研究。研究成果可为加强云降水物理和人工影响天气机制研究向更高水平迈进提供技术支持,也可为研究重力与湍流碰并共同作用、湍流影响的云生消、团簇等云微物理参量与湍流相互作用的科学研究提供科学数据。此外,进一步提高观测系统中显微光学系统的分辨率可应用于更小尺寸雾霾粒子的测量,再结合相态和形状的认识算法可为雾霾粒子的分类提供技术支持。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Y, Niu S J, Lu C S, et al. An observational study on cloud spectral width in North China [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(3): 109.
- [2] Lu C S, Liu Y G, Yum S S, et al. Reconciling contrasting relationships between relative dispersion and volume-mean radius of cloud droplet size distributions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(9): e2019JD031868.
- [3] Wang J, Cui T X, Wang Y, et al. Cloud detection for GF-5 visible-shortwave infrared advanced hyperspectral image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0928003.  
王健, 崔天翔, 王一, 等. 高分五号可见短波红外高光谱影像云检测研究 [J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0928003.
- [4] Li S, Sun X B, Ti R F, et al. Influence of scattering model and effective particle radius on cirrus cloud optical thickness retrieval [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0701001.  
李树, 孙晓兵, 提汝芳, 等. 散射模型和有效粒子半径对卷云光学厚度反演的影响 [J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0701001.
- [5] Stephens G L, Kummerow C D. The remote sensing of clouds and precipitation from space: a review [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(11): 3742-3765.
- [6] Waugh S M, Ziegler C L, MacGorman D R, et al. A balloonborne particle size, imaging, and velocity probe for *in situ* microphysical measurements [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, 32(9): 1562-1580.
- [7] Zhang H X, Wang X L, Sun J L, et al. Multidispersed bubble-size measurements by interferometric particle imaging at scattering angles of 90° and 45° [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(36): 10496-10504.
- [8] Jiang F Y, Zhang Y, Bu L B, et al. Calibration and measurement analysis of a cloud particle detection system based on polarization detection [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(36): 9777-9785.
- [9] Martin G M, Johnson D W, Spice A. The measurement and parameterization of effective radius of droplets in warm stratocumulus clouds [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1994, 51(13): 1823-1842.
- [10] Yum S S, Hudson J G. Adiabatic predictions and observations of cloud droplet spectral broadness [J]. *Atmospheric Research*, 2005, 73(3/4): 203-223.
- [11] Liu Y G, Daum P H, Guo H, et al. Dispersion bias, dispersion effect, and the aerosol-cloud conundrum [J]. *Environmental Research Letters*, 2008, 3(4): 045021.
- [12] Ma J Z, Chen Y, Wang W, et al. Strong air pollution causes widespread haze-clouds over China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D18): D18204.
- [13] Yin J F, Wang D H, Zhai G Q. Long-term *in situ* measurements of the cloud-precipitation microphysical properties over East Asia [J]. *Atmospheric Research*, 2011, 102(1/2): 206-217.
- [14] Zhao C S, Tie X X, Brasseur G, et al. Aircraft measurements of cloud droplet spectral dispersion and implications for indirect aerosol radiative forcing [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(16): L16809.
- [15] Dai S Q, Dou J Z, Zhang J W, et al. Digital holography based near-field imaging and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111008.  
戴思清, 豆嘉真, 张继巍, 等. 基于数字全息术的近场成像与应用 [J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111008.
- [16] Di J L, Li Y, Xie M, et al. Dual-wavelength common-path digital holographic microscopy for quantitative phase imaging based on lateral shearing interferometry [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(26): 7287-7293.
- [17] Zhang X, Wang S Y, Kong Y, et al. Transmission mode K-domain transform based digital holographic three-dimensional imaging technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2109001.  
张熙, 王绶瑀, 孔艳, 等. 透射式 K 空间变换数字全息三维成像技术研究 [J]. *中国激光*, 2021, 48(21): 2109001.
- [18] Bai C, Peng T, Min J W, et al. Dual-wavelength in-line digital holography with untrained deep neural networks [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(12): 12002501.
- [19] Ren Z B, Xu Z M, Lam E Y M. End-to-end deep learning framework for digital holographic reconstruction [J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1: 016004.
- [20] Chang X Y, Zeng Y N, Lei H, et al. Three-dimensional position measurement method with nanoscale precision for overlapped particles in liquid [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0812002.  
常新宇, 曾雅楠, 雷海, 等. 液态中交叠微球的三维纳米级位置测量方法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0812002.
- [21] Shui Y X, Hu L, Dai Y H, et al. Three-dimensional display of rotary mechanical parts based on digital

- holography[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(6): 060901.
- 税云秀, 胡琳, 戴姚辉, 等. 基于数字全息的回转类机械零件三维显示[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(6): 060901.
- [22] Tahir W, Kamilov U S, Tian L. Holographic particle localization under multiple scattering [J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1: 036003.
- [23] Zhang Y Y, Wu J C, Hao R, et al. Digital holographic microscopy for red blood cell imaging [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(16): 164201.
- 张益溢, 吴佳琛, 郝然, 等. 基于数字全息的血红细胞显微成像技术 [J]. *物理学报*, 2020, 69(16): 164201.
- [24] Xi T L, Di J L, Li Y, et al. Measurement of ultrafast combustion process of premixed ethylene/oxygen flames in narrow channel with digital holographic interferometry [J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 28497-28504.
- [25] Amsler P, Stetzer O, Schnaiter M, et al. Ice crystal habits from cloud chamber studies obtained by in-line holographic microscopy related to depolarization measurements [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(30): 5811-5822.
- [26] Fugal J P, Shaw R A. Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2009, 2(1): 259-271.
- [27] Beals M J, Fugal J P, Shaw R A, et al. Holographic measurements of inhomogeneous cloud mixing at the centimeter scale [J]. *Science*, 2015, 350(6256): 87-90.
- [28] Gao P, Wang J, Zhao C C, et al. Simultaneous measurement of cloud microphysical parameters based on digital holographic interferometry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(9): 099201.
- 高攀, 王骏, 赵成成, 等. 基于数字全息干涉术的云微物理参数同步测量方法 [J]. *物理学报*, 2021, 70(9): 099201.