

周黎明,王庆,龚佃利,等. 2015. 山东一次暴雨过程的云降水微物理特征分析. 气象, 41(2):192-199.

山东一次暴雨过程的云降水微物理特征分析^{* 1}

周黎明¹ 王 庆¹ 龚佃利¹ 李 芳²

1 山东省人民政府人工影响天气办公室, 济南 250031
2 山东省济宁市气象局, 济宁 272000

提 要: 以 2013 年 7 月 29 日发生在山东的一次暴雨过程为例, 利用高空间分辨率的 MODIS 极轨卫星资料以及布设在章丘的 THIES 激光雨滴谱仪连续采样获取的降水粒子谱资料, 并采用 Rosenfeld 等提出的云微物理分析方法, 对云和降水的微物理特征进行了分析。结果发现, 这个暴雨云团由多种不同高度的云系组成, 其中对流云团在 -10°C 以上存在深厚的混合相增长带和冰化增长带, 冰化增长起始温度基本都在 -20°C 左右。系统性层云中存在凝结增长、碰并增长和混合相增长过程, 但无冰化增长过程。此降水过程多次出现强度 $>100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的高雨强值, 最大雨滴数浓度达 10^4 量级, 并存在接近 8 mm 的特大滴, 降水强度与雨滴数浓度和谱宽的关系极为密切; 直径 $>2\text{ mm}$ 的雨滴数浓度不足 1%, 但对降水的贡献却占绝大多数。从雨滴谱谱型分布来看, 多峰型结构所占比例最大, 单峰型次之, 指数型分布出现频率最少。

关键词: 暴雨, 卫星反演, 激光雨滴谱仪, 云降水, 微物理特征

中图分类号: P426 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 02. 007

Microphysical Properties of Cloud and Precipitation During a Rainstorm Process in Shandong Province

ZHOU Liming¹ WANG Qing¹ GONG Dianli¹ LI Fang²

1 Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031
2 Jining Meteorological Office of Shandong, Jining 272000

Abstract: Taking the rainstorm that occurred in Shandong Province on 29 July 2013 as an example, microphysical properties of cloud and precipitation were investigated by using the microphysical analysis method developed by Rosenfeld and the high spatial resolution data of MODIS polar satellite and the precipitation particle spectrum data collected by the THIES laser rain droplet collector in Zhangqiu. The analyses show that the cloud cluster for the rainstorm is composed of various clouds with different heights. Deep mixed phase growth and glaciation zones exist in the convective cloud above -10°C and the initial temperature of glaciation growth is about -20°C . There is condensation growth, coalescence growth and mixed phase growth in systematic stratus clouds but no glaciations growth. The high rainfall intensity greater than $100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ occurs several times with maximum rain droplet concentration up to 10^4 , and the extremely big drop is close to 8 mm. So, there is a close relationship between rainfall intensity and rain droplet number concentration. The diameter of raindrops bigger than 2 mm is less than 1% of total concentration, but it is the vast majority of contribution to rain intensity. From the types of spectrum distribution, it can be seen that exponential distribution is less frequent, and multi-peak structure has the largest proportion.

Key words: rainstorm, satellite retrieval, laser rain droplet collector, cloud and precipitation, microphysical property

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406033)和山东省气象局课题(2013sdqx19、2012sdqxz07 和 2012sdqx12)共同资助
2014 年 3 月 28 日收稿; 2014 年 11 月 6 日收修定稿
第一作者: 周黎明, 主要从事云物理和人工影响天气工作. Email: zlmlove@163.com

引言

山东是缺水大省,暴雨是水资源的重要组成部分,占各地年总雨量的20%~30%。暴雨作为山东重要天气之一,汇集了淡水资源,在一定程度上解除了旱情、满足了人民生活和经济建设用水的需要,但大范围的持续暴雨或雨量过分集中的大暴雨,往往造成山体滑坡、水库垮坝、河堤决口、房屋倒塌、农作物被淹等洪涝灾害,给人民生命财产造成严重损失(曹钢锋等,1988;刘文等,2003)。

随着卫星反演技术的不断发展,利用卫星遥测的多光谱资料,可以获得云顶温度(T)、云顶粒子有效半径(R_e)、云的组成和相态等有关云特征的信息,能够为预报人员和人工影响天气作业指挥人员提供更加丰富的云微物理产品。国内许多学者在这方面已做了一些研究工作,戴进等(2010)利用卫星反演技术和云微物理分析方法,反演了云顶粒子有效半径、云顶温度等云物理特征参数;通过不同时次卫星对暴雨云团的探测资料,分析了暴雨发展过程。张杰等(2004)利用NOAA卫星数据,结合天气实况、环流场特征和雷达资料,分析了冰雹云的演变及特征。刘贵华等(2011)用极轨卫星资料和静止卫星资料分别反演高空间分辨率和高时间分辨率的云微物理特征,跟踪云系发展演变状况,把握增雨时机部位以指导作业。

激光雨滴谱仪资料可以用来分析雨滴等降水粒子的微物理结构和谱特征,通过了解自然降水中的物理过程,从而为研究成雨机制、评估人工增雨作业效果、临近预报及数值模拟等方面提供科学依据。蒋年冲等(2010)利用安装在安徽大别山区的Parsivel激光降水粒子测量系统获取的强雨雪天气过程资料,对不同降水类型的粒子数浓度及其谱分布、下落速度及其谱分布特征进行了分析。廖菲等(2011)为了研究降水微物理特征,利用激光降水粒子谱测量系统获取的锋面过程和台风登陆过程的降水资料以及雨滴尺度谱和速度谱观测信息,对珠江三角洲地区夏季典型雷电天气系统影响下的雨滴谱特征进行了较深入的分析。李德俊等(2013)利用激光雨滴谱仪和站点加密观测资料,对发生在武汉的一次短时暴雪天气过程的演变特征进行了分析。陈

磊等(2013)利用激光雨滴谱仪在淮南和南京同时观测的梅雨锋暴雨过程资料,采用阶矩法对Gamma函数进行拟合,分析了梅雨锋暴雨降水微结构特征。

近年来,从山东暴雨分类、雷达回波特征、气候特征、影响系统、暴雨落区、不同尺度天气系统的相互作用、物理量诊断分析和暴雨的预报方法等方面,对山东暴雨开展了大量的研究工作(袁佳双等,1994;阎丽凤等,1999;李昌义等,2000a;2000b;2000c;蒋伯仁等,2005;杨晓霞等,2008;2013;李春虎等,2011;刁秀广等,2014;胡桂芳等,2013;周雪松等,2014),但利用卫星反演技术、激光雨滴谱仪等资料来分析山东暴雨过程中云降水微物理特征而进行的研究工作还比较缺乏。本文利用MODIS卫星资料反演的 $T-R$ 关系以及激光雨滴谱观测资料对2013年7月29日发生在山东的一次暴雨过程进行分析,希望对此次暴雨过程中云和降水的微物理特征分析,能够为临近预报和降水形成机制研究起到一定的参考和借鉴作用。

1 资料说明

1.1 卫星反演数据来源

卫星资料来源于国家卫星气象中心接收的TERRA和AQUA极轨卫星基于1 km分辨率的MODIS资料一级产品HDF数据,该卫星数据文件包含可见光通道,1.6和2.1 μm 通道反射率,3.7、11和12 μm 通道亮温,太阳天顶角,卫星天顶角,太阳卫星相对方位角及地理经纬度等多项基本数据。利用陕西省气象科学研究所借助Rosenfeld的卫星微物理反演分析方法开发出的卫星反演软件,从HDF文件中提取、生成或加工成反演时所需的数据。

1.2 雨滴谱资料的获取

雨滴谱资料是利用安装在山东章丘市气象局内的一台德国THIES激光降水粒子谱仪,通过连续取样观测得到的数据。观测期间,仪器利用以激光测量为基础的光学传感器,通过测量降水粒子对激光强度的衰减程度和信号持续时间计算出降水粒子的尺度和下落速度。该仪器1 min获取一个样本,可得到降水类型、降水强度、粒子数浓度、下落速度

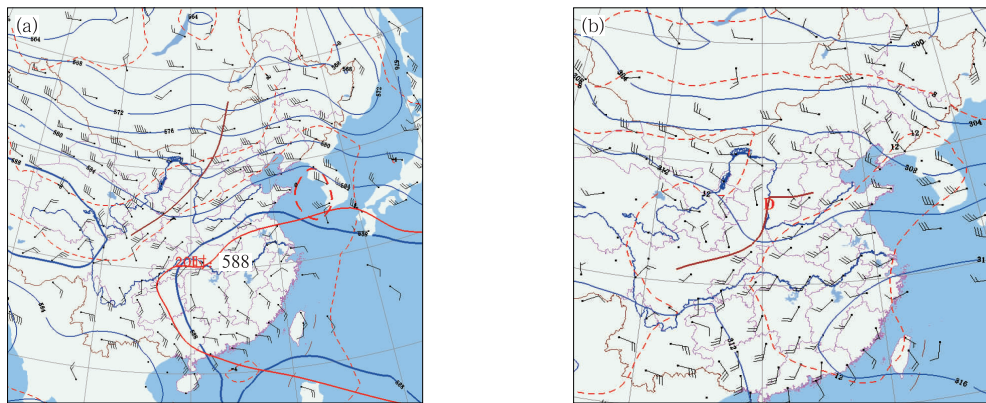
和谱分布等降水粒子信息。

2 降水天气概况

2.1 天气形势

2013年7月29—30日,山东出现一次强降水天气过程,全省有20个站达到暴雨级别,暴雨区主要出现在鲁东南和鲁中部分地区。29日08时500 hPa上西风槽建立,山东处在宽广的槽前西南气流中,588线北缘位于山东省鲁南地区;700 hPa山

西—陕西交界处有低涡生成,从孟加拉湾地区有一支西南急流向北输送,山东省处于低涡暖切变的南部(图1);850 hPa上低涡位置与700 hPa基本一致。受高空低槽、副热带高压外围西南暖湿气流和低层切变线共同影响,自12时起山东开始有降水形成。20时,500 hPa上588线略有南压西进,西风槽逐渐东移;700和850 hPa低涡北上东移至山东—河北交界处,纬向切变线的维持和西南急流的存在为此次降水过程提供了较好的动力和水汽条件。30日08时500 hPa济南上空转为西北气流,鲁西北和鲁中地区降水趋于结束。



云物理特征,达到可视化显示云特征的效果(戴进等,2010)。

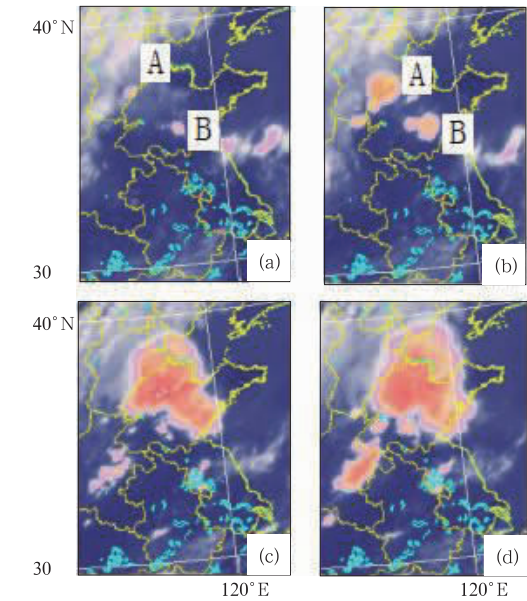


图 2 2013 年 7 月 29 日不同时刻 FY-2E 卫星云图
(a)12:00,(b)13:00,(c)15:00,(d)16:00
Fig. 2 FY-2E infrared satellite cloud image on 29 July 2013
(a)12:00 BT,(b)13:00 BT,(c)15:00 BT,(d)16:00 BT

3.1.2 云中微物理特征分析

成云过程大多由上升冷却饱和凝结而致,在云底形成的云滴随着气流上升会不断增长。若增长快则可能形成降水,若增长慢则会上升得更高,从而云中粒子大小随高度的变化可以反映云中粒子的增长速度,也就是说, $T-R_e$ 能够反映出云中微物理过程。Rosenfeld 等(1998)提出利用卫星资料反演云物理参数、结合云顶温度(T)和云顶粒子有效半径(R_e)关系分析云微物理特征的方法。他将云中微物理过程划分为 5 个主要过程:(1)凝结增长过程: $T>0^{\circ}\text{C}$,当云滴很小时可以伸展到 -10°C 层以上, R_e 一般 $<10\text{ }\mu\text{m}$,且随高度增加 R_e 增长缓慢。在 $T-R_e$ 分布图上表现为 $T>0^{\circ}\text{C}$ 或 -10°C , $R_e<10\text{ }\mu\text{m}$ 且 $-dR_e/dT$ 值较小(<0.4)。(2)碰并增长过程:主体处于温度较高但未达到冻结温度区, $R_e>10\text{ }\mu\text{m}$ 并随高度快速增长,表现出较大的 $-dR_e/dT(>0.4)$ 。(3)雨胚形成过程: R_e 基本保持不变,一般为 $20\sim25\text{ }\mu\text{m}$;云滴最大值由云顶附近稳定的上升气流所决定,如果云滴再长大些,上升气流无法托住云滴,将下落到较低部位,最终可能掉出云底。在 $T-R_e$ 分布图上表现为 $R_e=20\sim25\text{ }\mu\text{m}$, $-dR_e/dT=0$ 。

(4)混合相过程: $T<0^{\circ}\text{C}$,冰水共存,随高度上升 R_e 快速增长。在雨胚形成过程缺失的情况下,混合相增长带和碰并增长带的界线是模糊的。根据飞机观测结果,确定温度界线为 -8°C 。(5)冰化增长过程:云滴基本完全冰化, R_e 达到较大值,比雨胚形成带或混合相增长带下的 R_e 值要大,且稳定少变;大粒子通过聚并等作用形成雪花、霰、雹等降落到较低部位。

用 $T-R_e$ 来分析云中微物理过程中,为避免个别云像元代替整体的情况,必须在每一高度上选取较多的像元来反映云中每一高度上的总体状况。将分析区域内同一温度(高度)层所有云像元反演的 R_e 从小到大进行排序,作为一个样本总体。由于不同温度(高度)层的样本数量可能不一样,把样本数量进行归一化处理,从 5% 到 100%,如 10% 对应第 10% 样本的有效半径,……,90% 对应第 90% 样本的有效半径,当 100% 时对应最大的有效半径,用 50% 表示此高度层的整体情况。用不同颜色表征对应样本数百分比的 $T-R_e$ 曲线,给出一种定量反映云滴群体增长趋势。图 3 给出了 2013 年 7 月 29 日 13:49 MODIS 卫星(AQUA)的 RGB 合成图像。可以看出,MODIS 卫星观测到的云层次较为清晰,为便于分析暴雨过程中各种云的微物理特征,选取区域 1、2(红色)代表对流云团,区域 3(桃红色)代表没有被高云遮挡的高度略低的云,区域 4(黄色为主)代表系统性层状云。图 4 是利用 MODIS 卫星资料反演的 $T-R_e$ 分布图,其中 4 个 $T-R_e$ 分布分别与图 3 中 4 个相应区域相对应,图中 5 种不同颜色的曲线分别表示第 10%、25%、50%、75%、90% 样本的

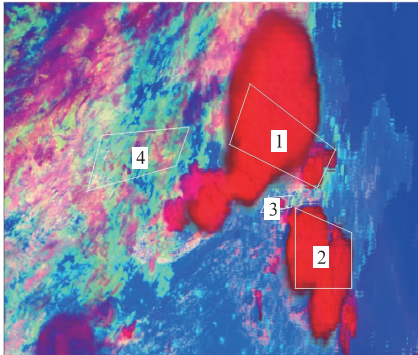


图 3 2013 年 7 月 29 日 13:49 MODIS 卫星(AQUA)RGB 合成图像
Fig. 3 RGB composite images of MODIS (AQUA) overpassed at 13:49 BT 29 July 2013

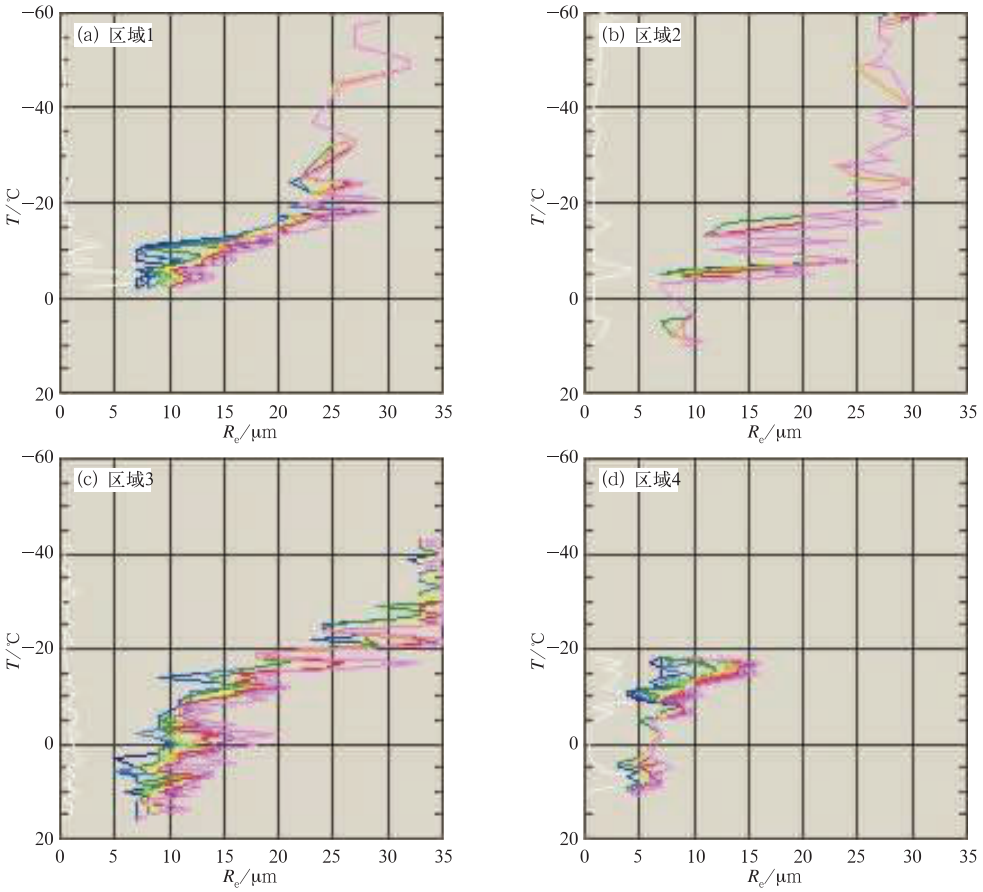


图 4 MODIS 卫星资料反演的 $T-R_e$ 分布

(图中从左至右蓝色、绿色、黄色、红色、桃色线分别表示 10%、25%、50%、75%、90% 的有效样本数下对应的 R_e 值随温度变化曲线)

Fig. 4 $T-R_e$ from the data of MODIS

(The curves of blue, green, yellow, red and pink indicate the variations of R_e with temperature for 10%, 25%, 50%, 75% and 90% available samples)

R_e 值随温度的变化曲线, 它的分散程度表现了某高度上云性状的不均匀程度, 其中第 50% 的 $T-R_e$ 曲线可以代表云的整体情况。由图 4 可以了解云中微物理特征和垂直结构。可以发现, (1) 区域 1 和区域 2 的云顶温度都在 -60°C 处, 说明这些对流云体发展得较为旺盛; 在 -10°C 以上存在深厚的混合相增长带和冰化增长带, 与凝结、碰并增长过程比较而言, 冰相增长过程(混合相增长和冰化增长)要深厚得多。其中区域 1 具有浅薄的凝结增长带, 主要位于 $-10\sim-2^{\circ}\text{C}$ 层; $-20\sim-10^{\circ}\text{C}$ 层的混合相增长带中 R_e 值增长迅速, 从 $10\ \mu\text{m}$ 不断增长到大于 $25\ \mu\text{m}$, 这表明冰水转化过程很快; 而区域 2 中凝结增长带较厚 ($-5\sim-10^{\circ}\text{C}$ 层), 同时存在很薄的碰并增长带。本次降水过程中, 对流云团的冰化增长起始温度基本都在 -20°C 左右。(2) 从区域 3 的 $T-R_e$ 分布图可见, 云顶温度在 -40°C 附近, 粒子尺度较大, 谱宽可达 $35\ \mu\text{m}$; 在正温区 ($T>0^{\circ}\text{C}$) R_e 值主要为 $5\sim10\ \mu\text{m}$, 此阶段以凝结增

长为主; 在 $-10\sim0^{\circ}\text{C}$ 层, R_e 值从 $10\ \mu\text{m}$ 随高度增长到 $20\ \mu\text{m}$, 增长速度较快, 其随温度变化率 $-dR_e/dT$ 明显大于凝结增长过程; $-30\sim-10^{\circ}\text{C}$ 附近有一较厚的混合相增长过程, R_e 值从 $15\ \mu\text{m}$ 快速增长到 $35\ \mu\text{m}$; 同时在混合相增长带上方, 存在 R_e 值随高度增长变化不大、基本维持在 $35\ \mu\text{m}$ 左右的冰化增长带。(3) 系统性层云区域 4 中, 底层的云滴有效半径 R_e 值较小, 一般仅为 $5\ \mu\text{m}$ 左右, 整体 R_e 值分布在 $5\sim15\ \mu\text{m}$, 且云顶温度 T 较高, 不足 -20°C ; 层云中存在凝结增长过程、碰并增长过程和混合相增长过程, 但没有冰化增长过程。

3.2 降水雨滴谱特征分析

3.2.1 微物理特征参量

雨滴谱特征参量能够体现出降水的一些微物理特性。图 5 给出了本次降水过程中, 山东章丘站利用激光雨滴谱仪连续观测得到的各微物理特征参量

随时间变化的特征。可以看到,此次暴雨过程中出现了多个降水峰区,其中有 2 个强降水中心($I > 100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)和 1 个较强降水中心($I > 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)。降水强度(I)和雨滴数浓度(N)、雨滴最大直径(D_{\max})的起伏变化趋势基本一致,即峰值、谷值随时间呈现同位相变化趋势,且各参量间起伏变化强度都很大,其中雨强最大值达到 $241.323 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,降水期间雨滴数浓度多数在 10^3 量级以上,最大数浓度达 $4.05 \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$,雨滴最大直径也多次出现接近 8 mm 的现象,这可能是由于降水强度太大,从而导致雨滴间相互碰并剧烈,从而形成较多的大粒子。综上所述,本次降水过程中雨强的增大是由雨滴数浓度增加和最大直径变大共同促成的,也就

是说,降水强度的大小与雨滴数浓度和谱宽的关系极为密切。

3.2.2 各档雨滴所占比例及其对雨强的贡献

为揭示雨滴的尺度分布所占比例及其与降水强度之间的关系,图 6 分别列出了各档直径的雨滴对数浓度和雨强的贡献率,其中 $<1 \text{ mm}$ 、 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 、 $2 \sim 3 \text{ mm}$ 、 $>3 \text{ mm}$ 的雨滴数浓度和对应的雨强分别表示为 $N_{<1 \text{ mm}}$ 、 $N_{1 \sim 2 \text{ mm}}$ 、 $N_{2 \sim 3 \text{ mm}}$ 、 $N_{>3 \text{ mm}}$ 和 $I_{<1 \text{ mm}}$ 、 $I_{1 \sim 2 \text{ mm}}$ 、 $I_{2 \sim 3 \text{ mm}}$ 、 $I_{>3 \text{ mm}}$; 则 $N_{<1 \text{ mm}}/N$ 、 $N_{1 \sim 2 \text{ mm}}/N$ 、 $N_{2 \sim 3 \text{ mm}}/N$ 、 $N_{>3 \text{ mm}}/N$ 分别代表各档直径雨滴占总数浓度的百分比, $I_{<1 \text{ mm}}/I$ 、 $I_{1 \sim 2 \text{ mm}}/I$ 、 $I_{2 \sim 3 \text{ mm}}/I$ 、 $I_{>3 \text{ mm}}/I$ 分别表示各档直径雨滴对雨强的贡献率。由图 6 可见,直径 $<1 \text{ mm}$ 的雨滴数浓度在 90% 以

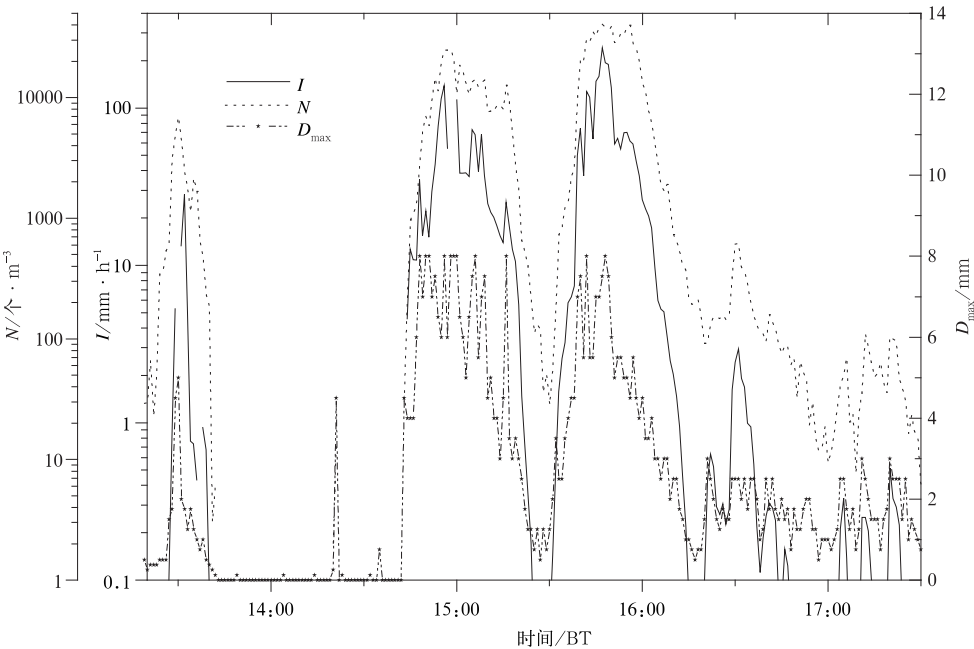


图 5 2013 年 7 月 29 日降水过程中各微物理特征参量随时间的演变

Fig. 5 Temporal evolution of the microphysical parameters during the precipitation on 29 July 2013

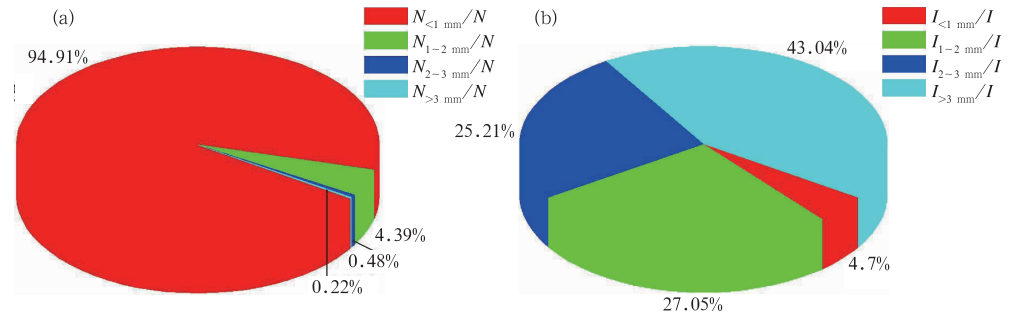


图 6 各档直径雨滴对数浓度(a)和雨强(b)的贡献率

Fig. 6 The contribution of the raindrops in various diameters to number concentration (a) and rainfall intensity (b)

上,占绝大多数,而雨强却仅为总降水雨强的4.7%;但直径>1 mm的雨滴数只有5%,而对雨强的贡献占到90%以上;特别是占雨滴总数不足1%的直径>2 mm的雨滴,对降水的贡献率接近70%。整体看来,本次降水过程中,占雨滴总数绝大部分的直径<1 mm的雨滴对降水贡献很小,直径>1 mm的雨滴在降水时对总降水强度贡献超过90%,特别是直径>3 mm的雨滴数仅为0.22%,但对雨强贡献接近50%。

3.2.3 雨滴谱瞬时谱型分布

按雨滴谱谱型分布特征将其分为3类:指数型、单峰型和多峰型(包括双峰型),选取本次过程中3类典型雨滴谱谱型分布如图7所示。分析瞬时雨滴谱分布特征可知,其中多峰型占总样本数的45.9%;单峰型所占比例略低,为42.6%;指数型最少,仅占11.5%。这与前人的研究结论具有一致性(顾震潮,1980),雷阵雨降水雨强变化剧烈,谱型出现双峰型的频率很大,多峰型(包括双峰型)分布

的出现在我国雷阵雨雨滴谱中是一种普遍现象,大雨滴数浓度变化振幅很大,呈多个峰值,谱很宽。

3.2.4 不同雨强下的平均雨滴谱分布

为了进一步研究此次暴雨过程雨滴谱的分布特性,根据 Caracciolo 等(2006)提出的将所有样本按照雨强大小分为6档进行分析: $0 < I \leq 2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, $2 < I \leq 5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, $5 < I \leq 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, $10 < I \leq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, $20 < I \leq 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, $I > 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,各雨强下的平均雨滴谱分布如图8所示。可以看到,随着雨强的增大,雨滴数浓度明显增加,且滴谱相应变宽,换言之,雨滴数浓度和谱宽均呈现显著增加趋势,谱型有明显外扩现象。但各档雨强下的雨滴谱谱型存在一定差异,基本表现为: $I \leq 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,平均谱型均体现出单峰特征,峰值直径为0.75 mm; $10 < I \leq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,雨滴谱谱型接近指数型分布;而 $I > 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,谱型为多峰结构,斜率变小,在较大滴端谱型有所抬升。总体而言,高雨强档的小粒子端数浓度大,且较大粒子亦明

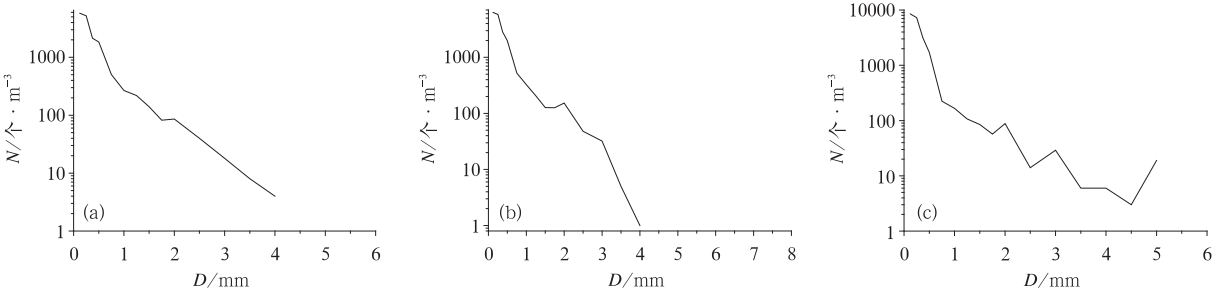


图 7 3 类典型雨滴谱分布

(a)指数型,(b)单峰型,(c)多峰型

Fig. 7 Distribution of three kinds of typical raindrop size

(a) exponential distribution, (b) single-peak distribution, (c) multi-peak distribution

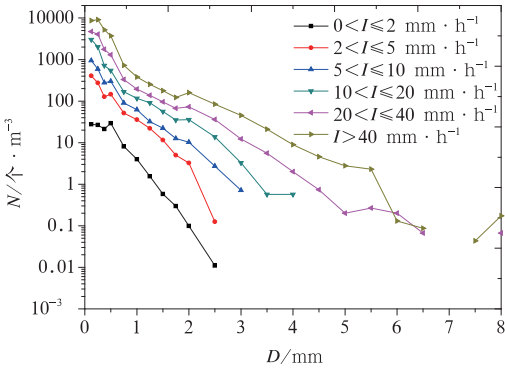


图 8 不同雨强下的平均雨滴谱分布

Fig. 8 Distribution of average raindrop size with different rainfall intensity

显增加,从而造成了雨强的增大;这主要是由于对流云降水中垂直气流旺盛,水汽充沛,滴谱的整体数浓度增大而使得雨强增大。

4 结 论

通过对 2013 年 7 月 29 日发生在山东的一次暴雨过程 MODIS 卫星资料和激光雨滴谱资料的分析,得出以下主要结论:

(1) 造成本次暴雨过程的云是由高度不同的云组成,其云顶温度亦存在很多差异。对流云高度较高,云顶温度低,最低温度达到-60℃;未被高云遮

挡的高度较低的云系,云顶温度在 -40°C 附近,粒子尺度较大,谱宽可达 $35\text{ }\mu\text{m}$;而系统性层云中云顶温度较高,处于 -20°C 附近, R_e 值较小,一般在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 左右,粒子有效半径在 $5\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 。

(2) 对流云在 -10°C 以上存在深厚的混合相增长带和冰化增长带,且冰化增长起始温度基本都在 -20°C 左右。未被高云遮挡的高度略低些的云系在正温区以凝结增长为主; $-30\sim -10^{\circ}\text{C}$ 附近有一较厚的混合相增长带,在其上方,存在 R_e 值随高度增长变化不大、基本维持在 $35\text{ }\mu\text{m}$ 左右的冰化增长带。系统性层云中存在凝结增长过程、碰并增长过程和混合相增长过程,但无冰化增长过程。

(3) 分析降水雨滴谱资料发现:本次暴雨最大雨强达 $241.323\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,最大数浓度为 $4.05\times 10^4\text{ 个}\cdot\text{m}^{-3}$,并多次出现接近 8 mm 的特大滴;降水强度与雨滴数浓度和谱宽的关系极为密切。雨滴数浓度大主要是由直径 $<1\text{ mm}$ 的小滴造成,但其对降水贡献很小;直径 $>2\text{ mm}$ 的雨滴的数浓度不足 1% ,对降水的贡献率却接近 70% ,特别是直径 $>3\text{ mm}$ 的雨滴数仅为 0.22% ,但对雨强贡献率近 50% 。

(4) 从瞬时雨滴谱分布特征来看,多峰型结构所占比例最大,单峰型次之,指数型分布出现频率最少。不同雨强下的平均雨滴谱谱型存在一定差异, $I\leq 10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,平均谱型基本表现为单峰型; $10<I\leq 20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,滴谱谱型为指数型分布;而 $I>20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,谱型呈现出多峰结构。

参考文献

曹钢锋,张善君,朱官忠,等. 1988. 山东天气分析与预报. 北京:气象出版社,156-180.

陈磊,陈宝君,杨军,等. 2013. 2009—2010年梅雨锋暴雨雨滴谱特征. 大气科学学报,36(4):481-488.

戴进,余兴,刘贵华,等. 2010. 一次暴雨过程中云微物理特征的卫星反演分析. 气象学报,68(3):387-396.

刁秀广,万明波,高留喜,等. 2014. 非超级单体龙卷风暴普勒天气雷达产品特征及预警. 气象,40(6):668-677.

顾震潮. 1980. 云雾降水物理基础. 北京:科学出版社,84-88.

胡桂芳,孟祥新,汤子东. 2013. 山东夏季降水量场预测模型的改进及预测效果检验. 气象,39(9):1210-1216.

蒋伯仁,孙兴池,张少林. 2005. 山东主汛期暴雨分析及预报研究综

述. 山东气象,25(2):1-4.

蒋年冲,胡雯,邵洋,等. 2010. 安徽大别山一次强降雨天气过程降水粒子特征分析. 气象,36(6):79-84.

李昌义. 2000. 客观暴雨预报在暴雨落点预报中的应用/暴雨落区预报实用方法. 北京:气象出版社,38-43.

李昌义,顾润源,孙兴池,等. 2000a. 非线性因子预报山东暴雨站数的研究/暴雨落区预报实用方法. 北京:气象出版社,48-52.

李昌义,顾润源,张飒,等. 2000b. 物理量综合指数预报山东暴雨落点方法研究/暴雨落区预报实用方法. 北京:气象出版社,1-4.

李昌义,顾润源,张飒,等. 2000c. 山东区域性暴雨和局地性暴雨物理量场特征分析/暴雨落区预报实用方法. 北京:气象出版社,108-114.

李昌义,顾润源,张飒,等. 1999. 暴雨站点预报在暴雨落点预报中的应用. 气象,25(8):25-29.

李春虎,李峰,任健,等. 2011. 涡旋自组织在山东暴雨预报中的应用研究. 大气科学学报,34(1):43-51.

李德俊,熊守权,柳草,等. 2013. 武汉一次短时暴雪过程的地面雨滴谱特征分析. 暴雨灾害,32(2):188-192.

廖菲,邓华,万齐林,等. 2011. 珠江三角洲地区两次夏季典型雷电天气系统的雨滴谱特征观测研究. 高原气象,30(3):798-808.

刘贵华,余兴,戴进,等. 2011. 地形云人工增雨条件卫星探测反演个例分析. 气象学报,69(2):363-369.

刘文,赵玉金,张善君. 2003. GMS卫星遥感资料监测暴雨技术. 气象,29(3):49-53.

阎润凤,蔡则鹏,王建国,等. 1999. 场相似在汛期暴雨预报中的应用. 气象,25(2):33-39.

阎润凤,孙兴池,周雪松. 2014. 影响山东的黄淮气旋暴雨落区分析. 气象,40(12):1439-1445.

杨晓霞,陈联寿,刘诗军,等. 2008. 山东省远距离热带气旋暴雨研究. 气象学报,66(2):236-250.

杨晓霞,吴炜,姜鹏,等. 2013. 山东省三次暖切变线极强降水的对比分析. 气象,39(12):1550-1560.

袁佳双,黎清才,顾润源,等. 1994. 山东暴雨雷达回波特征分析. 山东气象,56(3):29-33.

张杰,李文莉,康凤琴,等. 2004. 一次冰雹云演变过程的卫星遥感监测与分析. 高原气象,23(6):758-763.

周雪松,吴炜,孙兴池. 2014. 山东暴雨天气学预报指标的统计特征分析. 气象,40(6):744-753.

Caracciolo C, Prodi F, Battaglia A, et al. 2006. Analysis of the moments and parameters of a Gamma DSD to infer precipitation properties: A convective stratiform discrimination algorithm. Atmos Res, 80(2/3):165-186.

Rosenfeld D, Lensky I M. 1998. Spaceborne sensed insights into precipitation formation processes in continental and maritime clouds. Bull Amer Meteor Soc, 79:2457-2476.