

水云增长过程中的云滴谱及散射特性分析

宋跃辉 周煜东 王玉峰 李仕春 高飞 李博 华灯鑫

Analysis of particle size distribution and scattering characteristics of water cloud in condensation and coalescence growth

Song Yue-Hui Zhou Yu-Dong Wang Yu-Feng Li Shi-Chun Gao Fei Li Bo Hua Deng-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 249201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181544

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181544>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[改进的单次散射相函数解析表达式](#)

Modified analytic expression for the single-scattering phase function

物理学报.2017, 66(18): 180201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.180201>

[基于海杂波散射特性的微弱信号检测方法](#)

Detection of weak signal based on the sea clutter scattering

物理学报.2011, 60(11): 110208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.110208>

[两相邻有限长圆柱的复合电磁散射研究](#)

Composite electromagnetic scattering from two adjacent finite length cylinders

物理学报.2011, 60(2): 021102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.021102>

水云增长过程中的云滴谱及散射特性分析*

宋跃辉 周煜东 王玉峰 李仕春 高飞 李博 华灯鑫†

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2018年8月16日收到; 2018年10月9日收到修改稿)

基于大气物理学研究了水云云滴增长过程中的粒谱及散射特性. 研究表明, 凝结增长使粒谱半高宽和有效半径不断增加, 碰并增长使粒谱出现多峰分布, 有效半径增加. 在凝结增长和碰并增长共同作用下, 有效半径的平均增长速率为8 nm/s. 凝结增长和碰并增长单独作用下, 消光系数和散射系数随时间呈线性变化. 在二者共同作用下, 除3.2 μm 波长外, 消光系数和散射系数随时间呈指数增长; 1.064, 2.2, 3.7, 12和22 μm 波长的不对称因子逐渐趋于稳定, 200 μm 的不对称因子呈指数增长, 3.2 mm的不对称因子基本保持不变; 1.064和2.2 μm 波长的雷达比在20 sr附近波动, 3.7 μm 波长的雷达比呈大幅振荡. 云滴增长过程中, 水云在1.064, 2.2和3.7 μm 波长的单次散射反照率逐渐降低, 在12 μm , 22 μm , 200 μm 和3.2 mm波长的单次散射反照率逐渐增加, 波长指数的绝对值逐渐减小. 研究结果可为天气预报、地气辐射平衡研究和遥感数据校正提供重要的参考.

关键词: 水云, 凝结增长, 碰并增长, 粒谱, 散射特性

PACS: 92.60.nc, 11.80.La, 02.70.Uu

DOI: 10.7498/aps.67.20181544

1 引言

云是潮湿空气在上升运动过程中膨胀冷却形成的. 膨胀冷却使空气中的水汽达到饱和及过饱和, 即在凝结核上凝结出云滴来^[1]. 云是整个大气环境的重要组成部分, 常年覆盖了地球表面的一半. 大气中的中低云一般都是水云, 对人类生产生活有着非常重要的影响^[2]. 水云通过直接影响地面长波和太阳短波辐射在大气中的传输, 进而影响天气系统的辐射平衡^[3,4]. 大部分灾害性天气, 如暴雨、冰雹等, 都与水云密切相关^[5]. 水云还是人工影响天气的主要作业对象, 尤其是人工增减雨和防雹研究^[6,7]. 另外水云对大气遥感遥测、中低层航空作业都有非常重要的影响^[8]. 因此, 研究水云的散射特性对数值天气预报、自然灾害预警、人工影响天气及中低层大气的辐射传输等都具有非常重要的意义^[9-11].

数值仿真是研究水云散射特性的重要手段, 其中Mie散射理论得到了广泛应用^[12]. 2013年, 朱冰^[2]利用Mie散射理论仿真计算了水云粒子的

消光系数、散射系数等光散射参数. 2014年, Fang等^[13]结合Mie散射理论, 提出水云的红外辐射计算模型. 2015年, Shalygina等^[14]利用Mie理论计算了水云粒子的单次散射相函数.

辐射传输模式也是研究水云散射特性的重要方法^[15]. 2013年, Serrano等^[16]利用SBDART模式计算了Valencia地区的水云光学厚度, 并与libRadtran辐射模式进行比较, 两者结果相差2%. 2014年, 曹亚楠等^[17]采用MODIS云产品MYD06和大气产品MYD07数据, 利用水云条件下的通用大气辐射传输软件CART模拟计算实际大气下给定地区水云散射特性, 为水云大气辐射研究提供了一种新方法.

水云散射特性的研究可为确定环流模式中云辐射性质提供参考. 在气候变化研究中, 云的散射特性常常被假定为固定的, 这种假设使云对气候的影响仅局限于云量的变化, 而大量观测事实表明, 在气候变化过程中, 云的散射特性不可能保持不变. 实际上, 影响云散射特性的因素有很多, 云滴粒谱分布 (particle size distribution, PSD)、云粒子成分和形态等微物理性质都与云的散射特性

* 国家自然科学基金 (批准号: 41627807, 61405158) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2018JM6091) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

有关 [18,19].

水云云滴的成分、相态和形状是固定的, 因此云滴粒谱是影响水云散射特性的惟一因素. 另外, 在人工影响天气的研究中, 云微物理特性的研究是人工影响天气的理论基础, 因此研究水云云滴的微物理特性具有重要意义 [6]. 然而现有研究大都针对某一确定状态的水云展开, 不利于水云动态变化过程的研究. 鉴于此, 本文以大气物理学为基础, 分析凝结增长、碰并增长分别作用及二者共同作用下水云粒谱的动态过程, 并根据 Mie 散射理论研究了水云云滴增长过程中的散射特性.

2 水云云滴增长及粒谱分析

水云云滴增长可分为凝结增长和碰并增长. 凝结增长是指水汽分子不断聚集到云滴表面转变成液态而使云滴长大的过程. 碰并增长是由于地球重力和气流的带动作用, 运动中的云滴彼此碰撞而合并增大的过程 [1,5]. 实际中凝结增长和碰并增长总是同时存在的, 只是在不同阶段对水云云滴增长的贡献不同. 下面分别研究凝结增长、碰并增长分别作用及二者共同作用对水云粒谱的影响.

2.1 凝结增长

凝结作用由分子扩散和分子热传导两种输运过程决定. 由水汽扩散的麦克斯韦公式可得云滴凝结增长方程为

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{Dv}{\rho_w} (\rho_v - \rho_{s,r}), \quad (1)$$

其中, ρ_w 为水质量密度, ρ_v 为水滴的环境水汽密度, $\rho_{s,r}$ 为水滴表面平衡水汽密度, Dv 为水汽分子扩散

系数, 计算公式为

$$Dv = 0.211 \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.94}, \quad (2)$$

其中, $T_0 = 273 \text{ K}$, $P_0 = 101.3 \text{ kPa}$, P , T 为水滴周围环境的压强和温度. 由于水云中 T 和 P 变化机理非常复杂, 而本文重在研究水云云滴粒谱随时间的变化规律, 因此文中设定 T 等于 T_0 , P 等于 P_0 .

当云滴群因水汽扩散而凝结增长时, 将形成一个窄的, 趋于单分散性的云滴谱, 但观测表明实际云滴谱是宽而复杂的. 实际上, 上升气流、温度、含水量等的起伏都可能使云滴谱增宽. 起伏环境下气流的速度和温度等都是随机的, 因此云中水汽密度也是随机变量, 忽略曲率项对水滴表面平衡水汽压的影响, 凝结增长方程可写为

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{Dv}{\rho_w} \Delta\rho, \quad (3)$$

其中 $\Delta\rho$ 为过饱和水汽密度, 是满足正态分布的随机变量 [1,4]:

$$P(\Delta\rho) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta\rho}} \exp \left[-\frac{(\Delta\rho - \alpha_{\Delta\rho})^2}{2\sigma_{\Delta\rho}^2} \right], \quad (4)$$

其中 $P(\Delta\rho)$ 是随机变量 $\Delta\rho$ 的分布密度, $\alpha_{\Delta\rho}$ 和 $\sigma_{\Delta\rho}$ 分别为 $\Delta\rho$ 的期望和方差. (3) 式中, $\Delta\rho$ 为随机变量, 因此粒子半径 r 也是随机变量. 结合 (3) 和 (4) 式可得水云云滴凝结增长过程的粒谱分布方程为

$$f(r) = \frac{r\rho_w}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta\rho}tDv} \exp \left[-\frac{\left(\frac{r^2\rho_w}{2Dv} - \alpha_{\Delta\rho}t \right)^2}{2\sigma_{\Delta\rho}^2t^2} \right]. \quad (5)$$

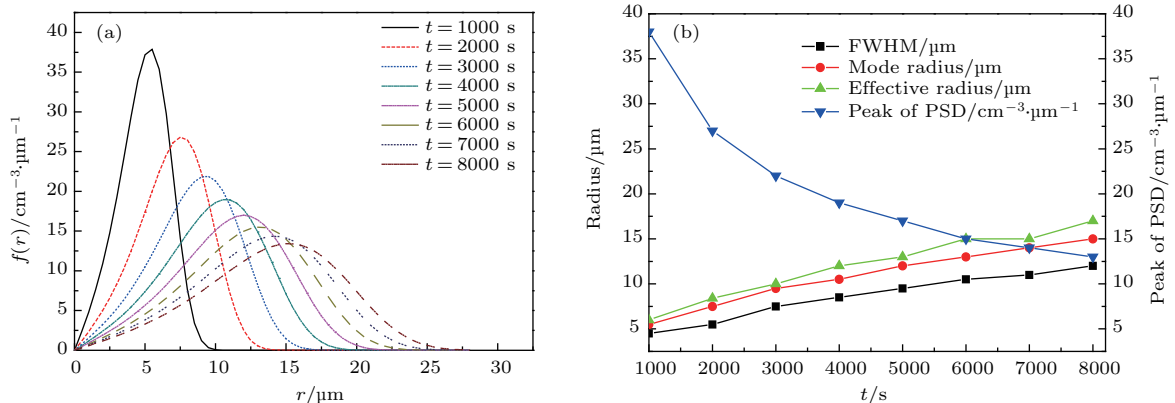


图1 水云云滴凝结增长过程中的 (a) 粒谱和 (b) 特征参数

Fig. 1. (a) PSD and (b) parameters of water cloud in condensation growth.

本文假设初始核滴均匀, $\alpha_{\Delta\rho}$ 为 $5 \times 10^{-10} \text{ g/cm}^3$, 云滴数密度为 $160 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-3}$, 起伏湿度场的均方差等于平均湿度场, 即 $\sigma_{\Delta\rho}$ 等于 $\alpha_{\Delta\rho}$ [1,5]. 在以上条件下, 凝结增长过程中水云粒谱及特征参数如图 1 所示.

由图 1 (a) 可知, 在起伏环境下, 初始均匀的云滴群通过凝结增长可形成不同粒径的云滴. 凝结增长过程中, 水云的粒谱半高宽 (full width at half maximum, FWHM)、模半径和有效半径均不断增加, 粒谱峰值逐渐降低, 其中 FWHM、模半径和有效半径均随时间呈近似线性增长, 三者都在 (1000 s, 8000 s) 时间范围内的平均增长速率分别为 1.07, 1.36 和 1.57 nm/s.

2.2 碰并增长

云滴碰并过程主要有布朗碰并和重力碰并, 布朗碰并由分子热运动引起, 对云滴可忽略不计, 因此水云云滴碰并增长以重力碰并为主 [5]. 在重力作用下, 水滴的下落速度不断增加, 而空气阻力与水滴下落速度的平方成正比, 重力和阻力很快达到平衡, 使水滴匀速下落, 此时的下降速度称为水滴的降落末速度.

通过求解水滴运动方程可获得水滴降落速度, 如 (6) 式所示:

$$v(t) = v_w(1 - e^{-t/\tau}), \quad (6)$$

其中 v_w 为 Stokes 降落末速度, τ 称为弛豫时间, 计算公式为

$$v_w = \frac{2gr^2}{9\mu} (\rho_w - \rho), \quad (7)$$

$$\tau = \frac{2r^2}{9\mu} (\rho_w - \rho), \quad (8)$$

其中 ρ_w 和 ρ 分别为水和空气的密度, g 为重力加速度, μ 为空气黏性系数.

云滴因下落末速度不同会发生碰并, 但俘获滴 (大云滴) 不一定能与它所扫掠体积中的所有粒子发生碰撞, 故有碰撞效率问题. 在云中, 半径为 r_1 的俘获滴穿过半径为 r_2 的小云滴时, 其碰撞系数 E_p 为

$$E_p = \left(\frac{N_g}{N_g + 0.5} \right)^2, \quad (9)$$

其中 N_g 为小水滴的惯性参数, 表达式为

$$N_g = \frac{2}{9} \cdot \frac{V_{r_1} \rho_w r_2^2}{\mu r_1}, \quad (10)$$

其中 V_{r_1} 为半径为 r_1 的粒子降落末速度.

水云云滴碰并过程中, 不同粒径的云滴都参与碰并, 它们既是收集滴, 也是被收集滴. 这种碰并模型可用随机碰并方程表示. 它描述了某一特定尺度粒子数密度随时间的变化规律, 随机碰并方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial n(r, t)}{\partial t} \\ &= \frac{1}{2} \int_0^r k(s, r') \left(1 - \frac{s^3}{r^3} \right)^{-2/3} n(s, t) n(r', t) ds \\ & \quad - n(r, t) \int_0^\infty k(s, r) n(s, t) ds, \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $n(r, t)$ 为粒谱分布函数, 自变量 r, s 表示两类粒子的半径, $k(r_1, r_2)$ 为核函数, 各参数表达式为

$$r' = (r^3 - s^3)^{1/3}, \quad (12)$$

$$r_1 = \text{Max}(s, r), \quad (13)$$

$$r_2 = \text{Min}(s, r), \quad (14)$$

$$k(r_1, r_2) = E\pi (r_1 + r_2)^2 (V_{r_1} - V_{r_2}), \quad (15)$$

其中 E 为碰并系数, 一般取 $E = E_p$ [1,5].

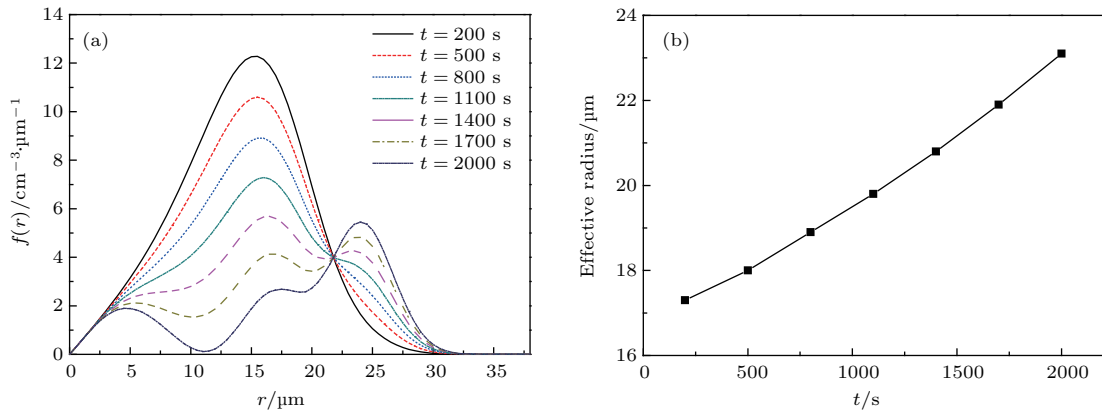


图 2 水云云滴碰并增长过程中的 (a) 粒谱和 (b) 有效半径
Fig. 2. (a) PSD and (b) effective radius of water cloud in coalescence growth.

由于粒径小于 19 μm 的云滴碰撞效率较小,因此在研究碰并增长时,初始粒谱选取凝结增长到 8000 s 时的粒谱 (详见图 1),并记为碰并增长的零时刻.此时粒子半径大于 19 μm 的云滴所占数目比例为 15.6%.碰并过程中云滴的粒谱分布如图 2 所示.

由图 2(a)可知,在碰并增长过程中,小于 5 μm 的粒子数目基本不变,该粒径范围内粒子的碰并系数小,被俘获的概率小,因此粒子数目变化不明显.碰并过程中,粒子半径在 15 μm 左右的云滴数显著减小,这表明该粒径范围的云滴是碰并增长的主要参与对象.在碰并增长过程中,云滴有效半径随时间呈近似线性增长,在 (200 s, 2000 s) 时间范围内的平均增长速率为 3.4 nm/s.值得一提的是,在碰并增长后期,水云粒谱出现多峰分布.

2.3 凝结增长和碰并增长共同作用时的粒谱

利用数值解法,获得了凝结增长和碰并增长共同作用下,水云云滴增长过程中的粒谱,其中初始粒谱与 2.1 小节中凝结增长的初始粒谱一致.算法流程如图 3 所示,粒谱如图 4 所示.

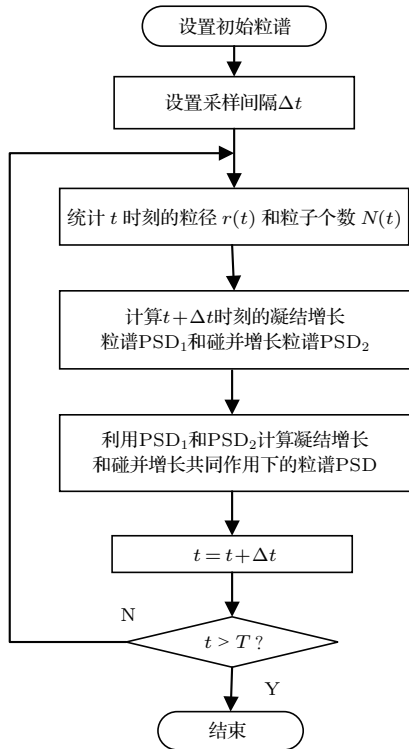


图 3 水云云滴增长算法流程

Fig. 3. Flow chart of water cloud PSD in condensation and coalescence growth.

由图 4(a)可知,凝结增长和碰并增长共同作用下,水云云滴的增长速率明显增加,出现半径为 10 μm 的云滴用时大约为 600 s,而在凝结增长中,这一过程需要 1000 s.由图 4(b)可知,云滴粒谱的有效半径在 (0 s, 2500 s) 范围内的平均增长速率为 8 nm/s,而在碰并增长和凝结增长中,增长速率分别为 3.4 和 1.57 nm/s.

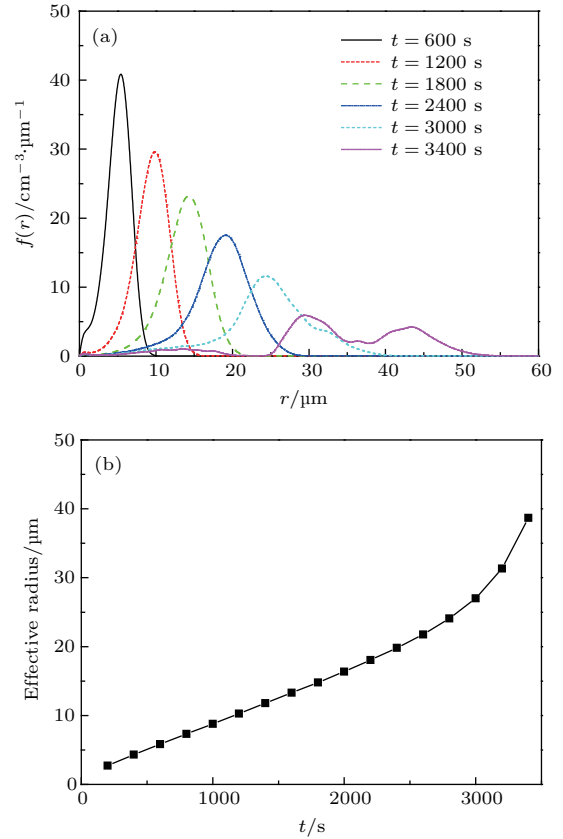


图 4 凝结增长和碰并增长共同作用时水云的 (a) 粒谱和 (b) 有效半径

Fig. 4. (a) PSD and (b) effective radius of water cloud in condensation and coalescence growth.

3 水云云滴增长过程中的散射特性

水云云滴的主要成分为水,在云滴增长过程中可认为其复折射率为常量.当水滴半径小于 500 μm 时,可近似为球形 [5,20].水云中绝大部分云滴的半径小于 500 μm ,因此云滴可视为均匀球形粒子.

基于以上条件,根据 Mie 散射理论结合水云粒谱,在忽略多次散射条件下可得群体水云粒子的散射特性 [12,21,22].其中,消光系数 α 、散射系数 γ 、后向散射系数 β 、单次反照率 w 和不对称因子 g 的计

算公式如下:

$$\alpha(t) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{\text{ext}}(m, r, \lambda) n(r, t) \pi r^2 dr, \quad (16)$$

$$\gamma(t) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{\text{sca}}(m, r, \lambda) n(r, t) \pi r^2 dr, \quad (17)$$

$$\beta(t) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{\text{b,sca}}(m, r, \lambda) n(r, t) \pi r^2 dr, \quad (18)$$

$$w = \frac{\gamma(t)}{\alpha(t)}, \quad (19)$$

$$g = \frac{\int r^2 Q_{\text{sca}}(m, r, \lambda) g(m, r, \lambda) n(r, t) dr}{\int r^2 Q_{\text{sca}}(m, r, \lambda) n(r, t) dr}, \quad (20)$$

其中 $g(m, r, \lambda)$ 表示半径为 r 的云滴粒子的不对称因子, $n(r, t)$ 表示水云随时间变化的粒谱.

在得到消光系数、后向散射系数的基础上, 根据定义可获得雷达比 S 和波长指数 A_{λ_1, λ_2} :

$$S = \frac{\alpha}{\beta}, \quad (21)$$

$$A_{\lambda_1, \lambda_2} = -\frac{\ln(\alpha_{\lambda_1}/\alpha_{\lambda_2})}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)} \quad (\lambda_1 < \lambda_2), \quad (22)$$

其中 α_{λ_1} 和 α_{λ_2} 分别为水云在 λ_1 和 λ_2 波长的消光系数.

分析了凝结增长、碰并增长分别作用及二者共同作用下, 水云在 1.064 μm (Nd:YAG 激

光器波长), 2.2 μm , 3.7 μm (卫星探测通道), 12 μm (卫星探测通道), 22 μm , 200 μm 和 3.2 mm (毫米波雷达) 波长的散射特性. 水云在以上波长的复折射率分别为 $1.327 - i2.89 \times 10^{-6}$, $1.296 - i2.89 \times 10^{-4}$, $1.374 - i0.0036$, $1.111 - i0.199$, $1.5 - i0.373$, $2.13 - i0.504$ 和 $3.4329 - i1.9793$ [23]. 当辐射波长大于 4 μm 时, 忽略了水云自身的热辐射.

3.1 凝结增长过程中水云的散射特性

水云云滴凝结增长过程的散射特性如图 5 所示. 凝结增长过程中, 除 3.2 mm 波长外, 水云的消光系数和散射系数均逐渐增加, 二者在 (1000 s, 8000 s) 时间范围内的增长速率详见表 1.

由图 5(c) 可知, 凝结增长过程中, 水云在 1.064, 2.2 和 3.7 μm 波长的单次反照率逐渐降低, 在 12 μm , 22 μm , 200 μm 和 3.2 mm 波长的单次反照率逐渐增加. 由图 5(d) 可知, 在 1.064, 2.2, 3.7, 12 和 22 μm 波长, 水云不对称因子在 0.6—1 之间. 在 200 μm 和 3.2 mm 波长, 由于波长远大于粒径, 水云的不对称因子在 0—0.2 之间, 表明云滴在各方向的散射分布比较均匀.

表 1 水云散射特性在云滴凝结增长中的增长率

Table 1. Growth rate of scattering parameters of water cloud from 1000 s to 8000 s.

| 波长 | 1.064 μm | 2.2 μm | 3.7 μm | 12 μm | 22 μm | 200 μm | 3.2 mm |
|--|---------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------------|
| 消光系数/ $\text{km}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ | 0.0299 | 0.0306 | 0.0317 | 0.0302 | 0.0381 | 0.0087 | 0.0003 |
| 散射系数/ $\text{km}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ | 0.0299 | 0.0298 | 0.0263 | 0.0137 | 0.0183 | 0.0018 | 5.75×10^{-8} |

由图 5(e) 可知, 凝结增长过程中, 在 1.064 μm 波长, 水云的雷达比为 19 sr 且基本不变; 在 2.2 μm 波长, 雷达比在增长前期波动较大, 增长后期在 24 sr 附近波动; 在 3.7 μm 波长, 雷达比变化范围较大. 由图 5(f) 可知, 在增长过程中水云云滴的波长指数在 -0.1—0.5 之间, 绝对值逐渐减小, 表明水云消光系数对波长的依赖性越来越弱.

3.2 碰并增长过程中水云的散射特性

根据 2.2 小节所得粒谱, 可得水云在碰并增长中的散射特性, 如图 6 所示. 在 1.064, 2.2, 3.7, 12 和 22 μm 波长, 水云的消光系数和散射系数逐渐减小. 碰并增长过程中, 云中含水量不变, 而云滴数

目和总截面积减小. 当入射波长远小于云滴粒径时, 碰并增长对单个云滴的消光和散射效率因子影响不大. 此时, 水云群滴的散射特性主要受云滴数目和截面积的影响. 因此, 在以上波长水云的消光系数和散射系数逐渐减小.

在 200 μm 和 3.2 mm 波长, 水云的消光系数和散射系数逐渐增加. 这两个波长大于云滴半径, 单个水云云滴的消光和散射效率因子随半径增加. 这是导致水云消光系数和散射系数逐渐增加的根本原因. 其中, 由于 3.2 mm 波长远大于云滴半径, 由云滴半径增加所引起的消光和散射效率因子变化不明显. 碰并增长过程中, 水云的消光系数、散射系数在 (200 s, 2000 s) 时间范围内的平均增长率如表 2 所列.

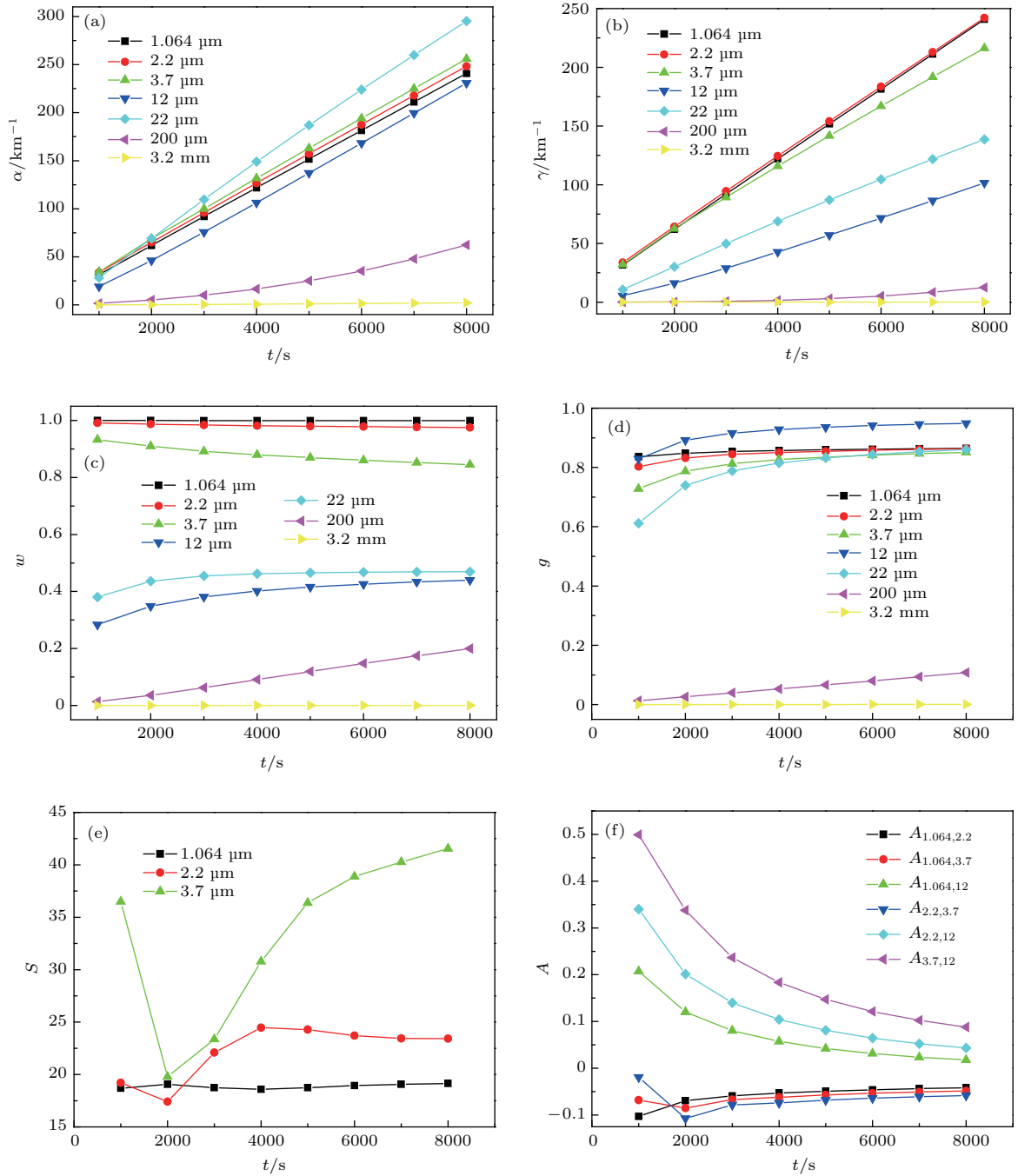


图5 水云凝结增长过程中的散射特性 (a) 消光系数; (b) 散射系数; (c) 单次散射反照率; (d) 不对称因子; (e) 雷达比; (f) 波长指数

Fig. 5. Scattering characteristics of the water cloud in condensation growth: (a) Extinction coefficient; (b) scattering coefficient; (c) single scattering albedo; (d) asymmetry factor; (e) lidar ratio; (f) Ångström exponent.

表2 水云散射特性在云滴碰并增长中的增长率
Table 2. Growth rate of scattering parameters of water cloud from 200 s to 2000 s.

| 波长 | 1.064 μm | 2.2 μm | 3.7 μm | 12 μm | 22 μm | 200 μm | 3.2 mm |
|--|---------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| 消光系数/ $\text{km}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ | -0.0338 | -0.0354 | -0.0370 | -0.0281 | -0.0446 | 0.0125 | 1.2×10^{-6} |
| 散射系数/ $\text{km}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ | -0.0338 | -0.0352 | -0.0349 | -0.0102 | -0.0203 | 0.0076 | 2.5×10^{-7} |

由图 6(c)可知, 碰并增长过程中, 在 1.064, 2.2 和 3.7 μm 波长, 水云的单次散射反照率逐渐降低, 在 12 μm , 22 μm , 200 μm 和 3.2 mm 波长, 水云的单次反照率逐渐增加. 由图 6(d)可知, 水云在 1.064, 2.2, 3.7, 12 和 22 μm 波长的不对称因子值主要集中在 0.8—1.0 之间, 且在 1.064, 2.2, 3.7 和 22 μm 波长的不对称因子非常接近. 在 200 μm

和 3.2 mm 波长, 水云的不对称因子在 0—0.2 之间.

由图 6(e)可知, 碰并增长过程中, 在 1.064 和 2.2 μm 波长, 水云的雷达比基本不变, 在 3.7 μm 波长, 雷达比逐渐增加. 由图 6(f)可知, 碰并增长过程中, 波长指数的值在 -0.06—0.08 之间, 绝对值逐渐减小.

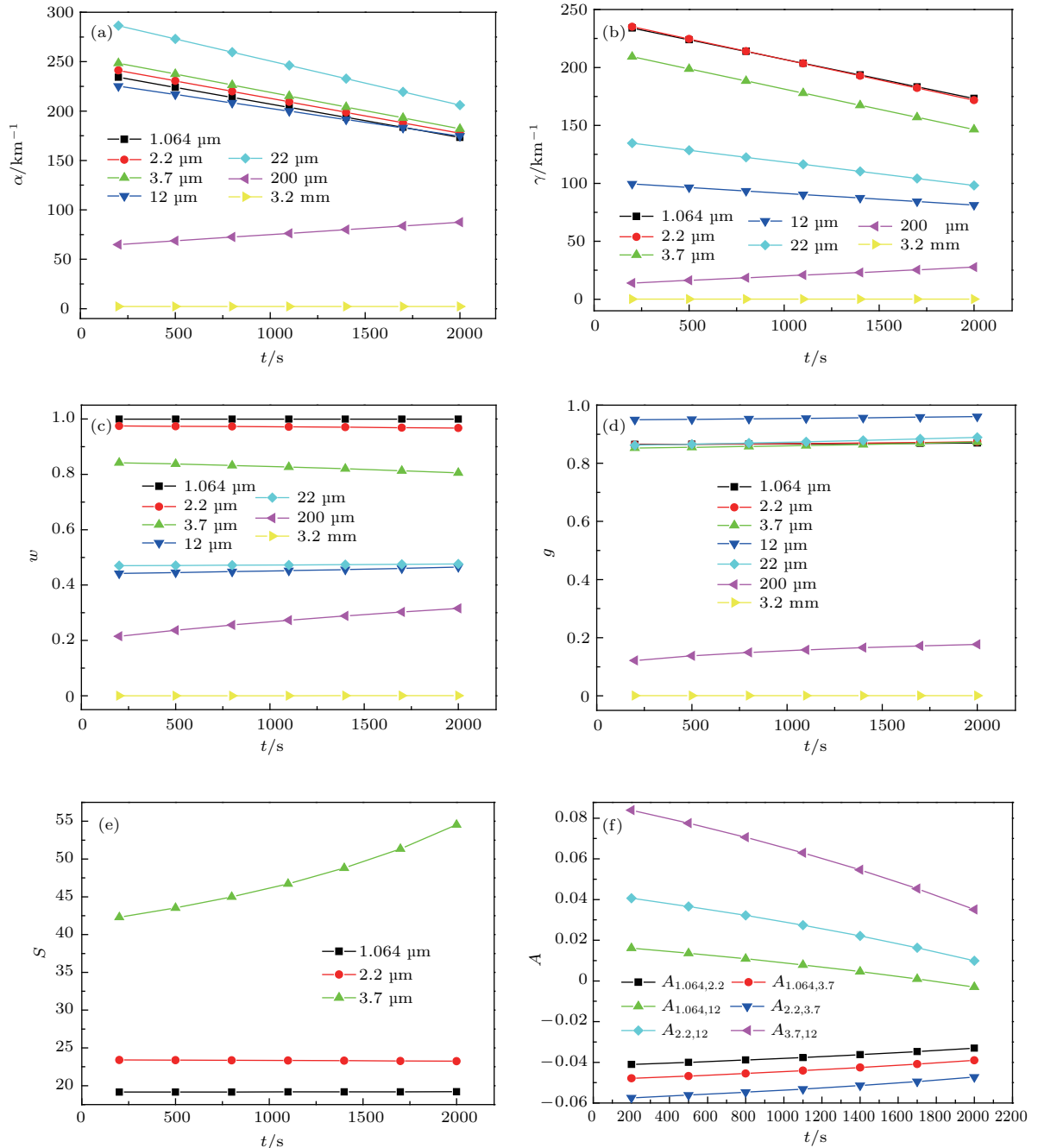


图 6 水云云滴碰并增长过程中的散射特性 (a) 消光系数; (b) 散射系数; (c) 单次散射反照率; (d) 不对称因子; (e) 雷达比; (f) 波长指数

Fig. 6. Scattering characteristics of the water cloud in coalescence growth: (a) Extinction coefficient; (b) scattering coefficient; (c) single scattering albedo; (d) asymmetry factor; (e) lidar ratio; (f) Ångström exponent.

3.3 凝结增长和碰并增长共同作用时水云的散射特性

凝结增长和碰并增长共同作用时水云的散射特性如图 7 所示. 在二者共同作用下, 除 3.2 mm 波

长外, 水云在其他波长的消光系数和散射系数均呈指数形式增加. 消光系数、散射系数及后向散射系数在 (200 s, 3400 s) 时间范围内的平均增长率如表 3 所列.

表 3 凝结增长和碰并增长共同作用时水云散射特性的增长速率
Table 3. Growth rate of scattering parameters of water cloud from 200 s to 3400 s.

| 波长 | 1.064 μm | 2.2 μm | 3.7 μm | 12 μm | 22 μm | 200 μm | 3.2 mm |
|--|---------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------------|
| 消光系数/ $\text{km}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ | 0.2250 | 0.2284 | 0.2323 | 0.2335 | 0.2589 | 0.2958 | 0.0050 |
| 散射系数/ $\text{km}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ | 0.0127 | 0.2163 | 0.1690 | 0.1142 | 0.1297 | 0.1417 | 1.17×10^{-6} |

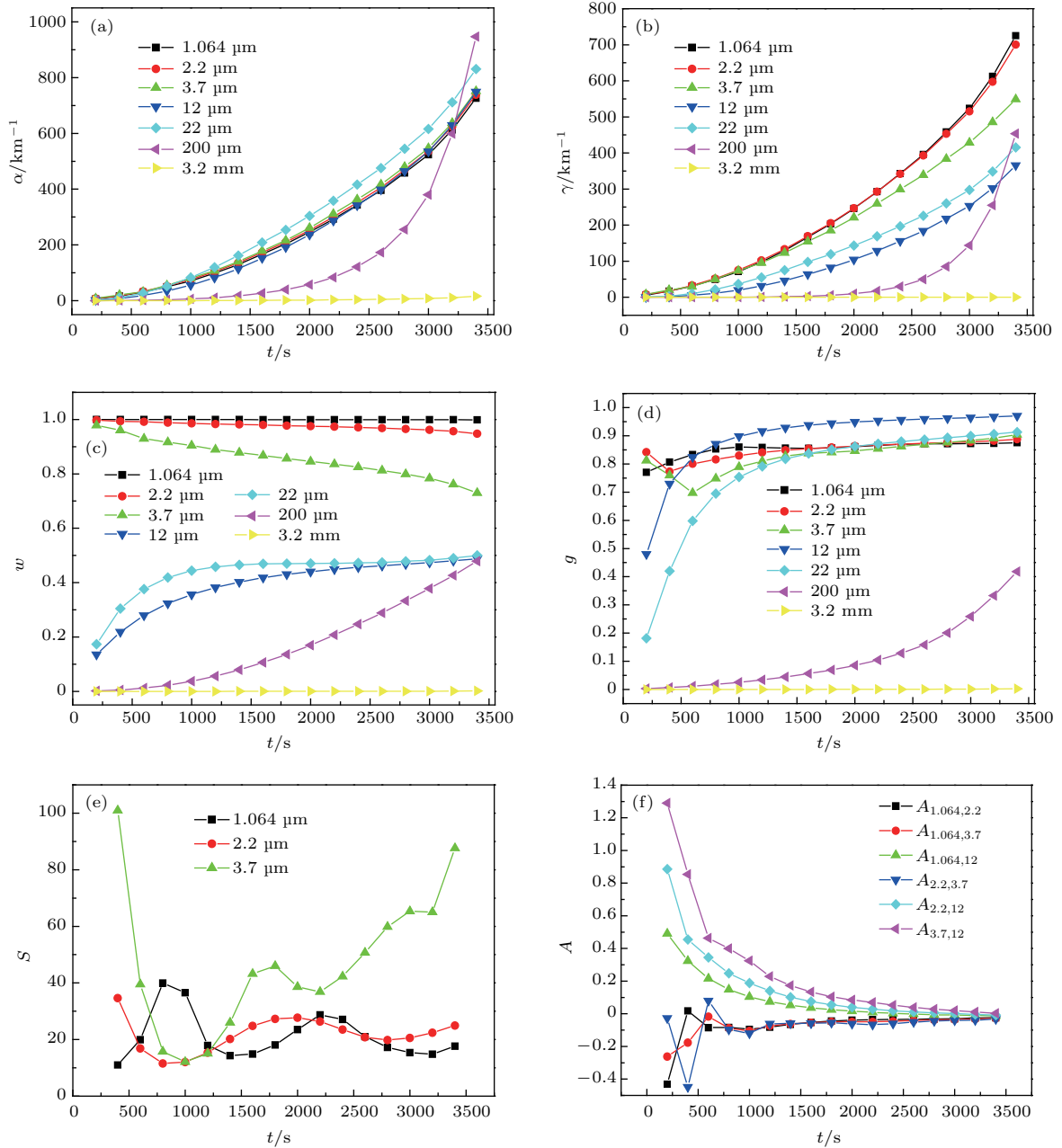


图 7 凝结增长和碰并增长共同作用时水云的散射特性 (a) 消光系数; (b) 散射系数; (c) 单次散射反照率; (d) 不对称因子; (e) 雷达比; (f) 波长指数

Fig. 7. Scattering characteristics of the water cloud in condensation and coalescence growth: (a) Extinction coefficient; (b) scattering coefficient; (c) single scattering albedo; (d) asymmetry factor; (e) lidar ratio; (f) Ångström exponent.

由图 7(c) 可知, 水云在 1.064, 2.2 和 3.7 μm 波长的单次散射反照率逐渐降低. 在 12 和 22 μm 波长的单次散射反照率先增加后趋于稳定, 且两值较为接近. 在 200 μm 和 3.2 mm 波长的单次散射反照率逐渐增加.

由图 7(d) 可知, 在 1.064, 2.2, 3.7, 12 和 22 μm 波长, 水云的不对称因子逐渐趋于稳定值, 在 0.8—1.0 之间. 2500 s 之后, 水云在 200 μm 波长的不对称因子显著增加, 表明 Mie 散射效应逐渐增强; 在 3.2 mm 波长, 不对称因子接近于 0.

由图 7(e) 可知, 云滴增长过程中, 水云在 1.064 和 2.2 μm 波长的雷达比在 20 sr 附近波动, 在 3.7 μm 波长的雷达比呈大幅振荡. 由图 7(f) 可知, 云滴增长过程中波长指数的绝对值都趋于 0, 表明消光系数对波长的依赖随云滴增长逐渐降低.

4 总 结

本文研究了在大气起伏环境中, 云滴的凝结增长、碰并增长分别作用及二者共同作用时, 水云粒谱的变化规律及散射特性. 研究表明: 凝结增长使粒谱半高宽和有效半径不断增加; 碰并增长使粒谱出现多峰分布, 有效半径增加; 凝结增长和碰并增长共同作用下, 有效半径的增长速率为 8 nm/s; 凝结增长和碰并增长单独作用下, 水云的消光系数和散射系数均随时间呈线性变化; 在二者共同作用下, 除 3.2 mm 波长外, 水云的消光系数和散射系数随时间呈指数增长; 云滴增长过程中, 水云在 1.064, 2.2 和 3.7 μm 波长的单次散射反照率逐渐降低, 在 12 μm , 22 μm , 200 μm 和 3.2 mm 波长的单次散射反照率逐渐增加, 波长指数的绝对值逐渐减小.

凝结增长单独作用下, 水云在 1.064, 2.2, 3.7, 12 和 22 μm 波长的不对称因子逐渐增加并趋于稳定, 在 200 和 3.2 mm 波长的不对称因子逐渐增加. 碰并增长单独作用下, 水云在各波长的不对称因子基本保持不变. 在二者共同作用下, 在 1.064, 2.2, 3.7, 12 和 22 μm 波长的不对称因子逐渐趋于稳定, 在 200 μm 的不对称因子呈指数增长, 在 3.2 mm 的不对称因子基本保持不变. 凝结增长单独作用下, 水云在 1064 nm 的雷达比为 19 sr, 且基本保持不变; 在 2.2 μm 波长, 雷达比在增长前期波动较大, 在后期雷达比在 24 sr 附近波动; 在 3.7 μm 波长, 雷达比大范围波动. 在碰并增长单独作用下, 在 1.064

和 2.2 μm 波长的雷达比基本不变; 在 3.7 μm 波长的雷达比逐渐增加. 二者共同作用下, 水云在 1.064 和 2.2 μm 波长的雷达比在 20 sr 附近波动.

参考文献

- [1] Shen P X 2003 *Atmospheric Physics* (Vol. 2) (Beijing: Peking University Press) pp296–358 (in Chinese) [盛裴轩 2003 大气物理学 (第二版) (北京: 北京大学出版社) 第 296—358 页]
- [2] Zhu B 2013 *M. S. Thesis* (Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology) (in Chinese) [朱冰 2013 硕士学位论文 (南京: 南京信息工程大学)]
- [3] Duan J, Liu Y 2011 *Meteorol. Sci. Technol.* **39** 408 (in Chinese) [段皎, 刘煜 2011 气象科技 **39** 408]
- [4] Xie X N, Wang Z S, Wang H L, Yue Z G 2016 *J. Earth Environ.* **7** 12 (in Chinese) [解小宁, 王昭生, 王红丽, 岳治国 2016 地球环境学报 **7** 12]
- [5] Nameless 1985 *Atmospheric Physics* (Beijing: China Meteorological Press) pp347–500 (in Chinese) [佚名 1985 大气物理学 (北京: 气象出版社) 第 347—500 页]
- [6] Hong Y C, Lei H C 2012 *Clim. Environ. Res.* **32** 951 (in Chinese) [洪延超, 雷恒池 2012 气候与环境研究 **32** 951]
- [7] Zhou Y Q, Cai M, Ou J J, Cai Z X, Shi A L 2011 *Trans. Atmos. Sci.* **34** 641 (in Chinese) [周毓荃, 蔡淼, 欧建军, 蔡兆鑫, 石爱丽 2011 大气科学学报 **34** 641]
- [8] Zhang H R 2015 *Modernizing Agric.* **2** 63 (in Chinese) [张宏茹 2015 现代化农业 **2** 63]
- [9] Song X P, Liu F, Tan Y F 2007 *Infrared Laser Eng.* **36** 700 (in Chinese) [宋雪平, 刘锋, 覃一凡 2007 红外与激光工程 **36** 700]
- [10] Liu Q, Chen X H, He X X, Wei H L 2010 *Laser Infrared* **40** 51 (in Chinese) [刘强, 陈秀红, 何晓雄, 魏合理 2010 激光与红外 **40** 51]
- [11] Zhang Z S, Zhang E S, Gao C X, Zhao W L 2002 *Nucl. Electron Detect. Technol.* **22** 465 (in Chinese) [张仲山, 张恩山, 高春霞, 肇文丽 2002 核电子学与探测技术 **22** 465]
- [12] Wiscombe W J 1980 *Appl. Opt.* **19** 1505
- [13] Fang Y Q, Xiang F, Zhu B, Cheng Z D, Zhan S 2014 *Infrared Phys. Technol.* **67** 84
- [14] Shalygina O S, Petrova E V, Markiewicz W J, Ignatiev N I, Shalygin E V 2015 *Planet. Space Sci.* **113–114** 135
- [15] Lei C X, Wu Z S 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5692 (in Chinese) [类成新, 吴振森 2010 物理学报 **59** 5692]
- [16] Serrano D, Marín M J, Núñez M, Utrillas M P, Gandía S, Martínez-Lozano J A 2015 *J. Atmos. So. Terr. Phys.* **130–131** 14
- [17] Cao Y N, Wei H L, Xu Q S, Dai C M, Chen X H 2014 *Acta Phot. Sin.* **43** 206 (in Chinese) [曹亚楠, 魏合理, 徐青山, 戴聪明, 陈秀红 2014 光子学报 **43** 206]
- [18] Wang H Q, Zhao G X 1996 *J. Appl. Meteor. Sci.* **7** 36 (in Chinese) [汪宏七, 赵高祥 1996 应用气象学报 **7** 36]
- [19] Wei X D 2011 *M. S. Thesis* (Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences) (in Chinese) [卫晓东 2011 硕士学位论文 (北京: 中国气象科学研究院)]
- [20] Dobson P J 1984 *Phys. Bull.* **35** 104

- [21] Li S 2018 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [李树 2018 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [22] Sun X M, Xiao S, Tang S, Su B C, Song M C, Deng H

W 2014 *Chin. J. Light Scatt.* **26** 340 (in Chinese) [孙贤明, 肖赛, 唐诗, 宿宝臣, 宋美春, 邓洪伟 2014 光散射学报 **26** 340]

- [23] Hale G M, Querry M R 1973 *Appl. Opt.* **12** 555

Analysis of particle size distribution and scattering characteristics of water cloud in condensation and coalescence growth*

Song Yue-Hui Zhou Yu-Dong Wang Yu-Feng Li Shi-Chun Gao Fei

Li Bo Hua Deng-Xin[†]

(School of Mechanical and Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(Received 16 August 2018; revised manuscript received 9 October 2018)

Abstract

Study of scattering characteristics of water cloud is of great significance for weather forecasting, meteorological disaster warning, weather modification and research of radiation transmission in the lower atmosphere. In this paper, particle size distribution and scattering characteristics of water cloud in condensation and coalescence growth are studied by numerical simulation. The particle size distribution model of water cloud in the condensation growth and coalescence growth are established respectively. The dynamic process of the particle size distribution of water cloud in the condensation growth, the coalescence growth and the condensation-coalescence combination growth are analyzed. Then the scattering characteristics of water cloud in the droplet growth are studied with the Mie theory. The results show that with the condensation growing the full width at half maximum of particle size distribution, the effective radius and mode radius of water cloud increase continuously. The effective radius increases in the coalescence growth process and there are multiple peaks in the particle size distribution in the coalescence growth anaphase. The average growth rate of the effective radius of cloud droplets is 8 nm/s in the condensation-coalescence combination growth. The extinction coefficient and scattering coefficient of water cloud increase linearly with time increasing during the condensation growth or the coalescence growth. In the condensation-coalescence combination growth, the extinction coefficient and scattering coefficient increase exponentially with time increasing except at a wavelength of 3.2 μm ; the asymmetric factors at the wavelengths of 1.064, 2.2, 3.7, 12 and 22 μm tend to be stable, while the asymmetric factor at the wavelength of 3.2 μm remains the same basically. Meanwhile, the lidar ratio at each of the wavelengths of 1.064 μm and 2.2 μm fluctuates near 20 sr, and that at the wavelength of 3.7 μm fluctuates greatly. In the growth process of cloud droplet, the single scattering albedo of water cloud decreases gradually at each of the wavelengths of 1.064, 2.2 and 3.7 μm , while it increases gradually at each of the wavelengths of 12, 22, 200 and 3.2 μm . The absolute value of Ångström exponent decreases gradually, which means that the wavelength-dependence of extinction coefficient decreases with cloud droplet growing. These research results reveal the change law of particle size distribution and the scattering characteristics of water cloud in condensation and coalescence growth. The results provide important reference for forecasting weather, studying earth-atmosphere radiation balance and correcting remote sensing data.

Keywords: water cloud, condensation growth, coalescence growth, particle size distribution, scattering characteristics

PACS: 92.60.nc, 11.80.La, 02.70.Uu

DOI: 10.7498/aps.67.20181544

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41627807, 61405158) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2018JM6091).

[†] Corresponding author. E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn