

可见光和红外波段大气散射强度特性

李浩, 孙学金, 唐丽萍
(解放军理工大学气象学院, 江苏南京 211101)

摘要:搜集整理了气溶胶、雾和雨的观测资料,运用米氏理论计算并分析了大气散射强度特性.结果表明:大气散射能量主要集中在前向较窄的散射角区间内,体散射相函数随散射角的分布取决于粒子尺度谱、波长和复折射指数,不同类型粒子体散射相函数随散射角的分布特性有较大的差异;大气单散射反照率受波长和复折射指数虚部影响,其值范围变化较大,相同波长下城市气溶胶单散射反照率小于雾,城市气溶胶和雾的单散射反照率随波长增大而减小.

关键词:可见光;红外;大气;体散射相函数;单散射反照率
中图分类号:P470.6 **文献标识码:**A

Characteristics of atmospheric volume scattering intensity in visible and infrared band

LI Hao, SUN Xue-Jin, TANG Li-Ping
(Institute of Meteorology, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: Different size distributions of aerosol, fog and rain collected. Atmospheric volume scattering intensity characteristics were calculated and analyzed according to Mie scattering theory. The results show that the energy of atmospheric volume scatter concentrated mainly in a narrow area of forward scatter angle. The distributions of volume scattering phase relied on particle size distributions, wavelength and complex refractive index, and was diverse for different type of particles. The atmospheric single scattering albedo was influenced by the wavelength and the imaginary of complex refractive index, and varied in a wide value range. The single scattering albedo of urban aerosols was less than that of fogs in the same wavelength. The single scattering albedo of urban aerosols and fogs were inversely proportional to the wavelength.

Key words: visible light; infrared; atmosphere; volume scattering phase function; single scattering albedo
PACS: 94.10.Gb

引言

大气散射是光在大气中传输时发生的重要物理过程,大气散射现象在许多领域得到应用.为了不同目的,已有对大气散射进行研究而取得的认识:气溶胶散射特性的变化可产生较大的能见度测量误差^[1];提高天气现象识别水平依赖于大气散射规律的认识^[2];大气散射过程近似将影响光雷达散射截面的计算精度^[3];接收角度和大气衰减是影响光散射通信的重要因子^[4].大气散射是多粒子系的体散射问题,对不同粒子类型、成分、谱分布与波长下大气散射特征的研究,已成为光通信、光雷达、天气现象识别和能见度测量等领域跨学科的课题.随着

观测资料的丰富和计算技术的发展,从理论上开展这方面研究的条件日渐成熟.

通过搜集整理典型天气条件下气溶胶、雾和雨的观测资料,运用米氏理论,模拟计算并分析可见光和红外波段大气散射相函数和单散射反照率,以期得到对大气散射特性具有可比性、代表性的认识,为与大气散射相关的应用提供理论支持.

1 计算方法与资料构成

1.1 大气散射计算方法

根据经典的米氏理论,使用计算效率较高的递推算法^[5],得到单个均质球状粒子对电磁波散射与吸收作用的问题解,见式(1):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s &= \frac{2\pi}{k_0^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \\ \sigma_t &= \frac{2\pi}{k_0^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n^2 + a_n'^2) \\ P(\theta) &= \frac{4\pi \cdot \beta(\theta)}{\sigma_s} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 σ_s 、 σ_t 和 $P(\theta)$ 分别为单个粒子的散射截面、衰减截面和散射相函数; a_n 、 b_n 为米散射参数; $\beta(\theta)$ 为散射函数, θ 为散射角; k_0 为波数, $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 为波长。

大气悬浮粒子间的距离大于粒子半径的三倍,且粒子位置随机变化,各部分波位相独立,因此大气粒子群的合成散射波强度等于各粒子部分散射波强度的代数和;由于粒子随机取向,可将粒子按球状近似处理。大气散射特征量按式(2)计算。

$$\left. \begin{aligned} \beta_s(\theta) &= \int_{r_1}^{r_2} n(r) \beta(\theta, r) dr \\ k_s &= \int_{r_1}^{r_2} n(r) \sigma_s(r) dr \\ k_t &= \int_{r_1}^{r_2} n(r) \sigma_t(r) dr \\ P^V(\theta) &= \frac{4\pi \cdot \beta_s(\theta)}{k_s} \\ \omega_0 &= \frac{k_s}{k_t} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 $\beta_s(\theta)$ 、 k_s 、 k_t 、 $P^V(\theta)$ 和 ω_0 分别为大气散射函数、散射系数、衰减系数、体散射相函数和单散射反照率; r 为粒子半径, r_1 、 r_2 分别为粒子尺度的下限、上限; $n(r)$ 为粒子尺度谱函数。

1.2 资料构成

大气散射问题主要取决于粒子尺度谱和复折射指数。搜集整理了中国境内 36 个典型天气条件下大气粒子观测资料^[6-10],包括气溶胶、雨和雾三大类型,其中乡村气溶胶、城市气溶胶、海洋气溶胶、沙尘气溶胶、雾、雨各六个样本,乡村气溶胶、城市气溶胶和海洋气溶胶均为 D 谱分布,雾为 Junge 分布、沙尘气溶胶为对数正态分布,雨为 M-P 分布,分别见式

(3)、式(4)、式(5)、式(6)。

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = ar^\alpha e^{-b \cdot r^\gamma} \quad , \quad (3)$$

$$n(r) = ar^{-b} \quad , \quad (4)$$

$$\frac{dN}{d(\log r)} = \sum_{i=1}^{c_n} \frac{c_i N_0}{2\pi^{\frac{1}{2}} \log \sigma_i} \exp\left(-\frac{(\log r - \log r_{ni})^2}{2 \log^2 \sigma_i}\right) \quad , \quad (5)$$

$$n(r) = a \cdot \exp(-b \cdot I^c \cdot r) \quad , \quad (6)$$

式(3)至式(6)中: r 、 N 和 n 分别为粒子半径、粒子数密度和粒子数密度谱;其余符号均为谱分布相关参数,其值由观测资料拟合给出。

不同类型粒子的化学成份差别较大,使得粒子复折射指数随粒子类型变化,且随波长呈现相当复杂的变化。为研究可见光和红外波段大气散射特性,选择 0.55 μm 、1.06 μm 、5.0 μm 和 10.59 μm 四个波长,假定粒子是均质的,粒子复折射指数的实部和虚部值根据文献 6 取值,见表 1。

2 结果与分析

2.1 粒子类型对大气散射相函数的影响

图 1 是 1.06 μm 波长下气溶胶、雨和雾样本体散射相函数随散射角的分布,可以看出:不同类型样本的体散射相函数曲线的离散性不同,气溶胶样本体散射相函数曲线离散性较大,雾样本体散射相函数曲线离散性较小,雨样本体散射相函数曲线则几乎完全重合。由表 1 可知,不同来源的气溶胶复折射指数取值不同,且气溶胶粒子复折射指数虚部较大,即吸收效应不可忽略,这是气溶胶区别于雾和雨的两个特点,也是气溶胶体散射相函数随样本多变的主要原因,从而使气溶胶样本体散射相函数曲线离散性较大。雾滴浓度和气溶胶浓度比较接近,但雾滴大小范围比气溶胶约大一个量级以上,不同大小雾滴的散射得到充分的平均,又由于在可见光与近红外波段雾的吸收效应很弱,雾样本复折射指数实部取值均为 1.33,因此雾体散射特性随样本变化较小。在可见光与近红外波段,雨的尺度参数较大,雨滴散射呈现出几何散射的特征,和气溶胶、雾相比,

表 1 不同粒子的复折射指数值

Table 1 The value of complex refraction index for different particles

类型	波长/ μm	0.55		1.06		5.0		10.59	
		实部	虚部	实部	虚部	实部	虚部	实部	虚部
雾和雨		1.333	0.000196	1.326	0.000005	1.325	0.012	1.179	0.067
海洋气溶胶		1.418	0.002	1.405	0.004	1.372	0.010	1.380	0.057
乡村气溶胶		1.530	0.006	1.520	0.014	1.390	0.013	1.720	0.085
沙尘气溶胶		1.530	0.008	1.520	0.008	1.250	0.016	1.620	0.120
城市气溶胶		1.607	0.158	1.600	0.163	1.593	0.218	1.859	0.310

雨滴数密度很低,由于破碎机制的作用,各档大小的雨滴保持在一定的比例上,因此雨的谱变化对体散射影响比较小,从而使得雨样本体散射相函数很一致.另外,图1还表明 $20^\circ < \theta < 50^\circ$ 散射角区间内雾样本体散射相函数曲线十分接近,在该散射角区间内雾散射光强和散射系数的比值不随样本变化,35°处散射相函数值最为一致,这和已有研究结果^[11]一致.对于气溶胶而言,并不存在某个明显的角度区间使体散射相函数不随样本变化,这与气溶胶复折射指数值的复杂性有关.

从图1还可看出,三种不同类型粒子体散射相函数曲线均比较平滑,明显不同于单个粒子散射相函数曲线.这是由于大气体散射是多粒子系散射相互叠加的结果,不同大小粒子散射能量峰值和谷值

互相抵消,从而使得合成散射能量随散射角变化不剧烈.相对而言,气溶胶样本散射相函数随散射角变化平缓,雨样本散射相函数变化较大,雾样本情况则介于两者之间,这是由三种类型样本粒子的大小不同引起的.气溶胶、雾和雨样本粒子半径分别在 $1\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 和 $1\ \text{mm}$ 三个量级,散射尺度参数依次增大,散射能量逐渐集中于前向角度,散射能量随散射角分布变化也越不均匀.在 0° 至 110° 左右散射角区间内,三种类型样本体散射相函数值随着散射角的增大而迅速减小,在 40° 左右体散射相函数已减小到1,大气体散射能量主要集中在 0° 至 40° 角度区间.在 100° 附近有一个较宽广的极小值区域,120°之后体散射相函数又有起伏变化,在 140° 附近体散射相函数基本上达到极大值.上述结果与已有的对大气体散射特性的认识^[12]一致.

在激光雷达应用等领域,比较关注后向散射能量,常用后向散射系数(记为 k_π)表示.瑞利散射情况下 $k_\pi = P^V(\pi) \cdot k_s = 1.5k_s$ ^[12],米散射的体散射相函数受尺度参数影响较大,通常认为在可见光与近红外波段满足 $0.13 < P^V(\pi) < 1.25$ ^[11], $P^V(\pi)$ 值随散射粒子类型变化,光雷达应用中通常取 $P^V(\pi) \approx 0.25$ ^[12],业务中一般假设 $k_\pi \approx ak_s$ ^[13].某些特定角度的散射是能见度仪设计、天气现象识别和光雷达探测等领域所要解决的核心问题^[2,3].类似于后向散射系数,可定义35°方向的散射系数(记为 k_{35°),则 $k_{35^\circ} = k_s \cdot P^V(35^\circ)$.图1中的结果表明:雾和雨的 $P^V(\pi)$ 约为0.71,气溶胶满足 $0.21 < P^V(\pi) < 0.62$;雾和雨的 $P^V(35^\circ)$ 分别为1.57、1.71,气溶胶满足 $1.18 \leq P^V(35^\circ) \leq 2.28$.

2.2 波长对大气体散射相函数的影响

入射波长变化将引起尺度参数和复折射指数值变化,进而影响大气体散射特性.计算了 $0.55\ \mu\text{m}$ 、 $1.06\ \mu\text{m}$ 、 $5.0\ \mu\text{m}$ 和 $10.59\ \mu\text{m}$ 四个波长所有样本的体散射相函数,结果表明雾和气溶胶体散射相函数在 $0.55\ \mu\text{m}$ 和 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长下均基本一致,这是由于气溶胶和雾在这两个波长下的复折射指数变化较小引起的.图2、图3分别是雾和气溶胶样本在 $5.0\ \mu\text{m}$ 、 $10.59\ \mu\text{m}$ 波长下体散射相函数分布的计算结果.

从图1b、图2可以看出:随着波长增大,雾的体散射相函数曲线趋于一致, 0° 处体散射相函数极大值逐渐变小,这是由于随着波长增大,尺度参数将变小,使得散射变得比较均匀;当波长增大时,雾后向散射起伏现象消失,这是由于波长较长时产生的较

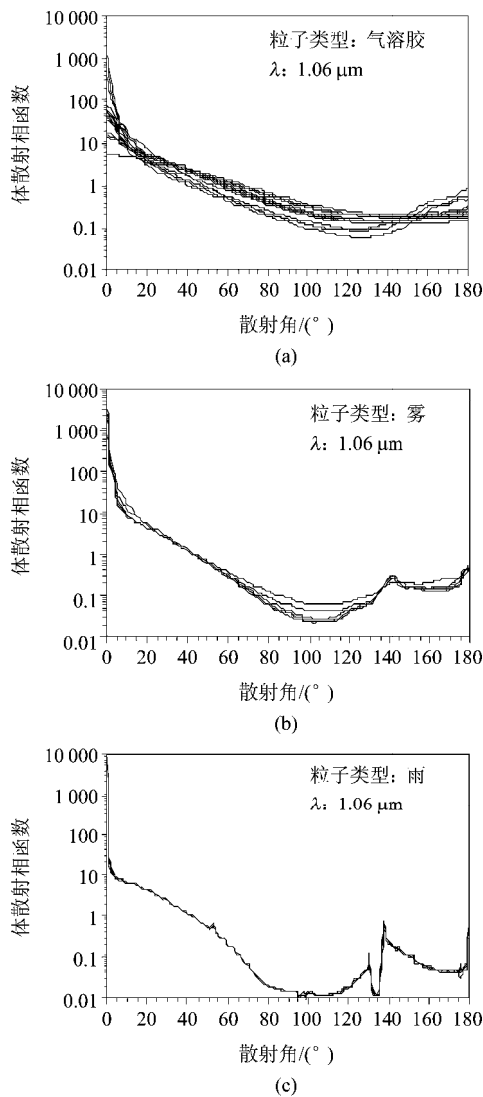


图1 三类样本体散射相函数 (a)气溶胶 (b)雾 (c)雨
Fig. 1 The volume scattering phase function of particle samples (a) aerosol (b) fog (c) rain

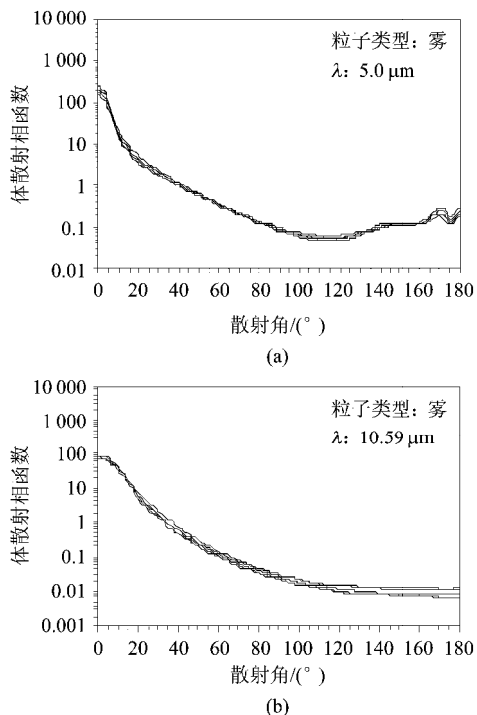


图2 不同波长下雾体散射相函数 (a)5.0 μm (b)10.59 μm
 Fig.2 The volume scattering phase function of fog samples in different wavelengths (a)5.0 μm (b)10.59 μm

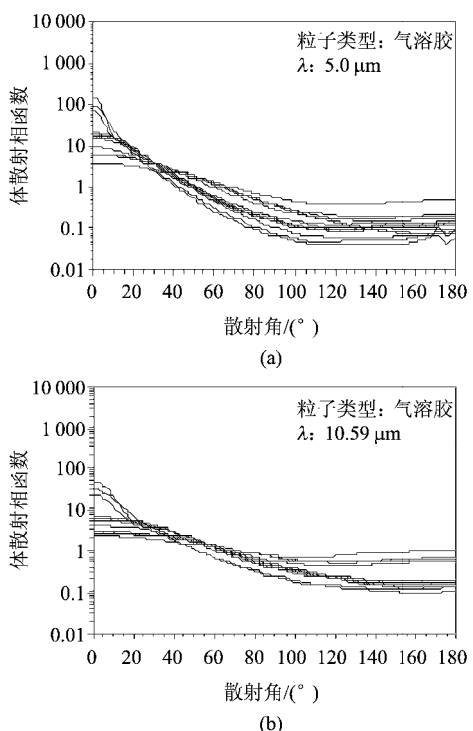


图3 不同波长下气溶胶体散射相函数 (a)5.0 μm (b)10.59 μm
 Fig.3 The volume scattering phase function of aerosol samples in different wavelengths (a)5.0 μm (b)10.59 μm

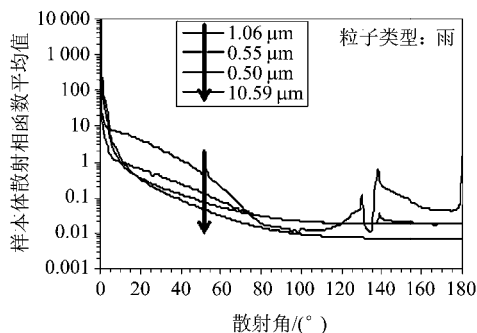


图4 不同波长下雨样本的体散射相函数平均值
 Fig.4 The average value of volume scattering phase function of rain samples in different wavelengths

强吸收效应引起的^[19].从图1a、图3可以看出:随着波长增大,气溶胶的体散射相函数曲线变得更平坦,且体散射相函数曲线有向下偏移的趋势,图3中气溶胶样本体散射相函数并没有趋于一致的倾向,这和图2中给出的雾的情况不一样,原因在于同一波长下雾样本的复折射指数相同,影响雾样本体散射相函数差异的主要因子是尺度参数,但气溶胶复折射指数取值随样本变化,气溶胶体散射相函数受尺度参数和复折射指数共同影响.

前已述及,同一波长下雨样本体散射相函数一致性很好,因此雨体散射相函数与样本平均值十分接近.图4给出四个波长下六个雨样本体散射相函数的平均值分布,可以看出,不同波长下雨样本体散射相函数平均值存在较大的差异,这表明雨体散射相函数受波长影响较大.比如,虽然0.55 μm和1.06 μm波长下雨的复折射指数很接近,但这两个波长下雨散射相函数有着显著的区别,这与前述雾和气溶胶的情况不同.初步分析表明,这是由于雨的含水量远大于雾,使得不同波长下复折射指数较小的差异对体散射造成的实际影响被放大,从而使得雨体散射相函数随波长变化较大.图1中顺着箭头方向所示,越向下偏移的体散射相函数所对应波长上雨的复折射指数实部越小、虚部越大.

2.3 粒子类型与波长对单散射反照率的影响

大气散射的同时也伴随着吸收,单散射反照率描述了散射效应在衰减效应中所占的大小.表2是0.55 μm、1.06 μm、5.0 μm和10.59 μm四个波长不同类型粒子样本单散射反照率计算结果.

从表2可看出,不同波长不同类型粒子单散射反照率有较大差异,1.06 μm雾的单散射反照率为0.999,而10.59 μm城市气溶胶的单散射反照率仅为0.261.四个波长下,雾、雨、海洋气溶胶、乡村气

表 2 不同波长下不同类型粒子单散射反照率
Table 2 The single scattering albedo of different type of particles in different wavelengths

类型	波长/ μm	0.55	1.06	5.0	10.59
雾		0.961	0.999	0.788	0.577
雨		0.557	0.967	0.533	0.520
海洋气溶胶		0.965	0.962	0.905	0.394
乡村气溶胶		0.946	0.886	0.896	0.679
沙尘气溶胶		0.709	0.784	0.806	0.583
城市气溶胶		0.591	0.520	0.339	0.261

溶胶、沙尘气溶胶和城市气溶胶的单散射反照率变化范围分别为 0.422、0.447、0.574、0.267、0.223、0.330。对于同样的波长,城市气溶胶的单散射反照率均小于雾,这主要是因为城市气溶胶复折射指数虚部远大于雾,吸收效应较强引起的;在可见光和近红外波段雾单散射反照率接近于 1,但随着波长增大,雾单散射反照率明显减小,这表明波长较长的情况下雾的吸收效应不能忽略。总的来说,单散射反照率主要取决于复折射指数虚部值,虚部值越大,单散射反照率通常就越小。

3 结论

针对气溶胶、雾和雨三种典型天气条件,运用米氏理论计算并分析了大气体散射特性,结果表明,大气体散射相函数比单个粒子散射相函数平滑得多,散射能量主要集中在 0° 至 40° 散射角区间内;气溶胶体散射相函数随散射角分布较为平缓、受粒子类型影响较大,雨体散射相函数随散射角变化较快、几乎不受粒子类型影响,雾体散射相函数的相应情况介于气溶胶和雨之间;在可见光与近红外波段, 35° 处雾体散射相函数约为 1.57, 20° 至 40° 散射角区间内其值几乎不随粒子类型变化,气溶胶则不存在类似的散射角区间, 180° 处雾和雨的体散射相函数约为 0.71, 180° 处气溶胶体散射相函数在 0.21 至 0.62 之间;不同类型大气体散射特性随波长变化规律不同,不同的雾体散射相函数随波长增大趋于一致,气溶胶体散射相函数曲线随波长增大有向下偏移的趋势,雨体散射相函数随散射角的分布受波长影响显著;不同波长不同类型粒子的单散射反照率有较大差异,其值在较大范围内变化,相同波长下城市气溶胶单散射反照率远小于雾,城市气溶胶和雾的单散射反照率随波长增大有减小趋势。

将气溶胶、雾和雨三种粒子近似为球状,并视作几种典型的成份构成,但对于冰晶、雪花和冰雹等大粒子而言,则必须考虑形状因子,此外某些特殊成份

粒子散射特性也值得关注。需要说明,根据样本资料所得的结果是否具有普遍性,仍需进一步研究。

REFERENCES

- [1] LI Hao, SUN Xue-Jin. Theoretical analysis of measurement error of forward scattering visibility meter[J]. *Infrared and Laser Engineering*(李浩,孙学金.前向散射能见度仪测量误差的理论分析.红外与激光工程),2009,38(6):1094-1098.
- [2] SUN Xue-Jin, WANG Xiao-Lei, LI Hao. *Atmospheric sounding*[M]. Beijing:China Meteorological Press(孙学金,王晓蕾,李浩.大气探测学.北京:气象出版社),2009.
- [3] Sasano Y, Browell E V. Light scattering characteristic of various aerosol types derived from multiple wavelength lidar observations[J]. *App. OPT.*,1989,28(9):1670-1679.
- [4] FENG Tao, CHEN Gang, FANG Zu-Jie. Properties of optical scattering channel in non-line-of-sight UV[J]. *Infrared and Laser Engineering*(冯涛,陈刚,方祖捷.非视线紫外光散射通信的信道特性.红外与激光工程),2006,35(Z):226-230.
- [5] YUAN Yi-Jun, REN De-Ming, HU Xiao-Yong. Computing scattering phase function by recursive formula of Mie theory[J]. *Chinese Journal of Light Scattering*(袁易君,任德明,胡孝勇. Mie 理论递推计算散射相位函数.光散射学报),2006,17(4):366-371.
- [6] ZHANG Cheng-Chang, ZHOU Wen-Xian. *Atmospheric aerosol tutorial*[M]. Beijing:China Meteorological Press(章澄昌,周文贤.大气气溶胶教程.北京:气象出版社),1995:277.
- [7] CHENG Tian-Tao, LV Da-Ren, CHEN Hong-Bin. The size distribution of dust aerosol particles in Onqin Daga sandland[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*(成天涛,吕达仁,陈洪滨.浑善达克地区沙尘气溶胶的粒谱特性.大气科学),2005,29(1):116-121.
- [8] HUANG Yu-Sheng, HUANG Yu-Ren, LI Zi-Hua. The microphysical structure and evolution of winter fog in Xishuangbanna[J]. *Acta Meteorologica Sinica*(黄玉生,黄玉仁,李子华.西双版纳冬季雾的微物理结构及演变过程.气象学报),2000,58(6):715-725.
- [9] GONG Fu-Jiu, LIU Ji-Cheng, LI Zi-Hua. Study of the rain-drop size distributions for three types of precipitation[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*(宫福久,刘吉成,李子华.三类降水云雨滴谱特性研究.大气科学),1997,21(5):607-614.
- [10] ZHOU X J, TAO SH CH, YAO K Y. *Advanced Atmospheric Physics*[M]. Beijing: Meteorological Press(周秀骥,陶善昌,姚克亚.高等大气物理学.北京:气象出版社),1990:750-768.
- [11] Tonna G, Shlrin K S. Reliability of the polar nephelometer for the measurement of visibility in fog[J]. *Appl. Opt.*,1992,31(15):2932-2941.
- [12] LIAO Guo-Nan. *An introduction to atmospheric radiation*[M]. Beijing: Meteorological Press(廖国男.大气辐射导论.北京:气象出版社),2004.
- [13] Sasano Y. Tropospheric aerosol extinction scanning lidar measurements over Tsukuba Japan from coefficient profiles derived from 1990 to 1993[J]. *Appl. Opt.*,1996,35(24):4941-4952.