

大气气溶胶谱分布的多波长拟合模拟反演

徐继伟^{1,2}, 刘 东¹, 谢晨波¹, 王珍珠¹, 王邦新¹, 钟志庆¹, 马 晖^{1,2}, 王英俭¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 在构建 355, 532, 1064 nm 3 个波长的后向散射效率因子与 355 nm 和 532 nm 两个波长的消光效率因子查算表的基础上, 正演计算出气溶胶的 3 个波长的后向散射系数与两个波长的消光系数(3β 和 2α)。通过非线性拟合, 模拟反演了对数正态单峰分布情况下气溶胶的谱分布参数。结果表明: 该方法可以反演得到单峰分布的气溶胶谱分布参数, 不同初始值对反演结果的影响较小; 复折射指数对气溶胶谱分布的反演起重要作用, 当复折射指数的实部和虚部分别具有 ± 1 步长范围内的不确定性时, 反演得到的粒子数浓度、几何标准偏差和峰值半径 3 个参数的相对误差分别为 20.32%、33.50% 和 24.72%, 其中实部比虚部的误差贡献更大。该研究为多波长激光雷达反演气溶胶谱分布垂直廓线的研究提供了理论基础。

关键词 大气光学; 气溶胶; 谱分布; 非线性拟合; 激光雷达; 多波长

中图分类号 P407.5 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1001006

Multi-Wavelength Fitting Simulation and Inversion of Atmospheric Aerosol Spectrum Distribution

Xu Jiwei^{1,2}, Liu Dong¹, Xie Chenbo¹, Wang Zhenzhu¹, Wang Bangxin¹,
Zhong Zhiqing¹, Ma Hui^{1,2}, Wang Yingjian¹

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract On the basis of constructing the lookup-table of the backscattering efficiency factors of three wavelengths (355, 532, 1064 nm) and the extinction efficiency factors of two wavelengths (355 nm and 532 nm), the aerosol backscattering coefficients of three wavelengths and the extinction coefficients of two wavelengths (3β and 2α) are calculated. The inversion of spectrum distribution parameters of unimodal log-normal aerosol is simulated by nonlinear fitting. Results show that the spectrum distribution parameters of unimodal log-normal aerosol can be successfully inverted by this method. The effects of the different initial values on inversion results are small. The complex refractive index plays an important role in the inversion of the aerosol spectrum distribution. When the real and imaginary parts of the complex refractive index have the uncertainty of $+1$ and -1 step length respectively, the relative errors of the number concentration of particles, geometrical standard deviation and median radius are 20.32%, 33.50% and 24.72% respectively. The real part of the complex refractive index brings greater error than imaginary part. The study provides a theoretical foundation for the study of inverting vertical profile spectrum distribution of aerosol with multi-wavelength lidar.

Key words atmospheric optics; aerosol; spectrum distribution; nonlinear fitting; lidar; multi-wavelength

OCIS codes 010.1290; 010.1110; 010.1100

1 引 言

气溶胶通过散射和吸收作用可以直接影响太阳短波辐射, 同时气溶胶可以充当云的凝结核, 从而改变云

收稿日期: 2017-03-29; **收到修改稿日期:** 2017-06-08

基金项目: 国家 973 计划(2013CB955802)、国家自然科学基金(41305022, 41405032)

作者简介: 徐继伟(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: 708999976@qq.com

导师简介: 刘 东(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光雷达探测新技术的研发、数据应用研究, 星载激光雷达探测技术以及 A-Train 卫星序列数据分析和应用等方面的研究。E-mail: dliu@aiofm.ac.cn(通信联系人)

的微物理特性和云寿命,最终影响地-气系统辐射平衡。联合国政府间气候变化专门委员会第5份评估报告^[1]报道了气溶胶-辐射相互作用和气溶胶-云层相互作用对辐射和气候的影响具有很大的不确定性。在日益严重的空气污染问题中,气溶胶扮演着非常重要的角色。京津冀、长三角和珠三角等地区频繁发生雾霾现象,使得气溶胶的物理化学以及光学属性受到越来越多的关注^[2-5],时间和空间上的大气气溶胶观测变得尤为重要。激光雷达作为主动遥感,可以探测大气气溶胶的宏、微观廓线信息,也能够获取云的相关信息,这对于研究气溶胶辐射强迫和气候效应非常有益^[6]。伯广宇等^[7-8]利用双波长激光雷达研究了气溶胶波长指数与相对湿度的关系。而随着反演算法的改进和发展,多波长拉曼激光雷达遥感探测气溶胶的平均半径、粒子数浓度(体积浓度和质量浓度)以及复折射指数等微物理参数也成为可能^[9],目前国内关于这方面的工作还比较少。中国科学院大气成分与光学重点实验室研制了三波长拉曼偏振激光雷达系统^[10],利用该系统获取气溶胶和云的光学参量^[11-14],包括355,532,1064 nm波长的气溶胶后向散射系数和355 nm、532 nm气溶胶消光系数(3β 和 2α),以及532 nm通道的气溶胶退偏振比,可以进行气溶胶谱分布反演的相关研究。

谱分布的反演方法主要有两类:一类是不进行谱分布形式的假设,通过正则化并结合数学约束的方法进行粒子谱的反演^[15-16];另一类是假设气溶胶谱分布参数化的情况下,利用均值坐标法^[17]、蒙特卡罗法^[18]和非线性拟合^[19]等方法进行反演。第一类方法在反演复杂的气溶胶谱时比较灵活,第二类方法的优势在于针对性较强,在假设气溶胶谱分布的情况下,可近似确定气溶胶的复折射指数。气溶胶谱分布的主要形式有3种,包括荣格分布^[20]、伽马分布^[21]和对数正态分布^[22]。本文使用对数正态分布形式表示气溶胶的单峰谱分布,理论上可以使用3个光学参量拟合获得含有3个未知量的单峰谱分布,但双峰或三峰谱分布含有6个以上的参数,必须使用 3β 和 2α 进行拟合。为了保证反演过程的连续性,本文使用 3β 和 2α 进行单峰谱分布参数的拟合。首先假定一种气溶胶类型,并给出单峰谱分布参数,通过米散射理论正演计算得出该类型气溶胶的 3β 和 2α ,利用这5个光学参量进行非线性拟合,反演得出该气溶胶的谱分布参数,最后分析复折射指数的不确定性对反演结果造成的影响。

2 气溶胶光学属性

利用激光雷达探测手段可以获取气溶胶的后向散射系数和消光系数的垂直分布廓线,在后向散射系数和消光系数中包含了气溶胶谱分布和复折射指数等重要的气溶胶物理和光学属性,了解这些属性对于研究气溶胶产生、消失的发展过程非常重要。

气溶胶后向散射系数 β 表示气溶胶对光的后向散射能力,气溶胶消光系数 α 表示气溶胶的消光(散射和吸收)能力。假定气溶胶为球形粒子,则有

$$\beta_{\lambda} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{\lambda}^{\text{B}}(r, m) \pi r^2 n(r) dr, \quad (1)$$

$$\alpha_{\lambda} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{\lambda}^{\text{E}}(r, m) \pi r^2 n(r) dr, \quad (2)$$

式中 β_{λ} 和 α_{λ} 分别为波长 λ 处的气溶胶后向散射系数和消光系数, Q_{λ}^{B} 和 Q_{λ}^{E} 分别为粒径 r 处的后向散射效率因子和消光效率因子, m 为气溶胶在波长 λ 处的复折射指数, $n(r)$ 为气溶胶粒子的谱分布, r_{\max} 和 r_{\min} 分别为粒径的最大、最小尺寸。后向散射效率因子和消光效率因子可以根据米散射理论计算求得^[23]。气溶胶谱分布采用对数正态分布来表示,其解析形式为

$$n(r) = \frac{N}{\sqrt{2\pi} r \ln \sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln r - \ln r_m}{\ln \sigma} \right)^2 \right], \quad (3)$$

式中 N 为单位体积内的粒子数浓度, σ 为几何标准偏差, r_m 为峰值半径。在气溶胶分布比较复杂的情况下,可以用2个或3个对数正态分布线性组成双峰或三峰来表征气溶胶的谱分布。

气溶胶复折射指数 m 为气溶胶的重要光学常数,由气溶胶的物质组成决定,一般用实部 m_r (散射性质)和虚部 m_i (吸收性质)两部分表示。表1给出了对流层内气溶胶主要成分在波长355,552,1064 nm处的复折射指数^[24-25]。可以看出, m_r 在波长为350~1000 nm内的变化范围为1.3~1.8,并且随波长的增加, m_r 的变化较小。 m_i 的变化范围为0~0.1,波长增加时 m_i 有量级上的变化。煤烟类型的气溶胶具有强吸收性,虚

部可以达到 0.44 左右。表 2 给出了对流层内主要的气溶胶类型及其构成组分^[26], 大气中的气溶胶主要是这些成分的有机组合。气溶胶的组分越多, 表明气溶胶的物理化学性质越复杂, 大陆型的气溶胶主要由水溶性、煤烟和较少的类沙尘气溶胶构成。

表 1 气溶胶成分和水在不同波长处的复折射指数

Table 1 Complex refractive index of aerosol components and water at different wavelengths

Component	Index at 355 nm		Index at 532 nm		Index at 1064 nm	
	m_r	m_i	m_r	m_i	m_r	m_i
Water-soluble	1.530	5.00×10^{-3}	1.530	6.00×10^{-3}	1.520	1.70×10^{-2}
Soot	1.750	4.65×10^{-1}	1.750	4.40×10^{-1}	1.750	4.40×10^{-1}
Dust-like	1.530	8.00×10^{-3}	1.530	8.00×10^{-3}	1.520	8.00×10^{-3}
Oceanic	1.390	1.20×10^{-7}	1.381	4.26×10^{-9}	1.370	2.43×10^{-5}
Sulfate	1.452	1.00×10^{-8}	1.430	1.00×10^{-8}	1.423	1.50×10^{-6}
Mineral	1.530	1.70×10^{-2}	1.530	5.50×10^{-3}	1.530	1.00×10^{-3}
Water	1.343	6.50×10^{-9}	1.333	1.96×10^{-9}	1.327	2.86×10^{-6}

表 2 气溶胶类型及其组成成分

Table 2 Types and components of aerosol

Type	Component
Clean continental	Water-soluble and dust-like
Urban & rural & continental & industrial	Water-soluble, soot and dust-like
Desert dust	Mineral
Maritime-clean maritime-mineral maritime-polluted	Oceanic and sulfate
	Oceanic, sulfate and mineral
	Water-soluble, soot and oceanic

气溶胶的光学参量与气溶胶的复折射指数关系密切, 图 1 给出了 Q_a^B 和 Q_a^E 随 m_r 和 m_i 的变化情况, m_r 的取值依次为 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, m_i 的取值依次为 0, 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} , 1。在图 1(a) 中, 粒径大于 $0.1 \mu\text{m}$ 时, Q_{532}^B 随半径变化有较大波动, 当 m_i 较小 ($0 \sim 10^{-3}$) 时, 粒径在 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 的粒子随 m_r 的增大明显增大; 图 1(b) 中, 粒径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 时, Q_{532}^E 随半径的变化波动较小, m_r 对 Q_{532}^E 的影响不大, 随着粒子半径的增大, Q_{532}^E 趋近于 2。复折射指数对 Q_{532}^B 有较大影响, 而对 Q_{532}^E 的影响较小, 表明 Q_{532}^E 对于复折射指数和半径的变化敏感性较低, 所以消光系数对于反演气溶胶的谱分布更为重要。

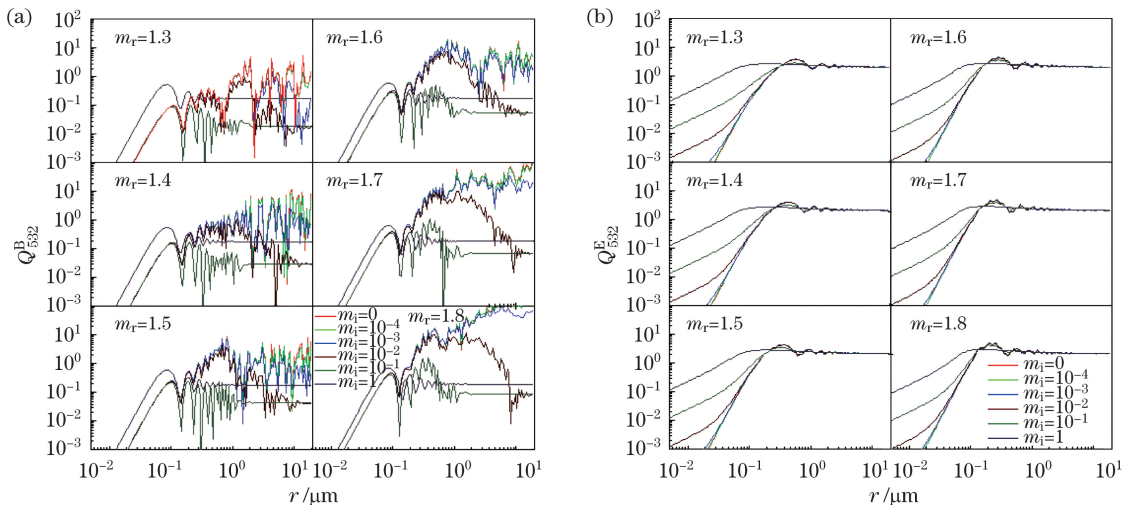


图 1 复折射指数对 (a) Q_{532}^B 和 (b) Q_{532}^E 的影响

Fig. 1 Influence of complex refractive index on (a) Q_{532}^B and (b) Q_{532}^E

3 反演方法

大气中典型的气溶胶成分在表 1 中已经给出。 m_i 的取值范围设置在 1.3~1.8 之间(步长为 0.025), m_i 的变化范围在 0~0.1 之间,具体设置为 0,0.0005,0.001~0.009(步长为 0.001),0.01~0.10(步长为 0.01),构成 21×21 的复折射指数矩阵,通过米散射理论计算该矩阵的散射和消光效率因子查算表(Q_{355}^B 、 Q_{532}^B 、 Q_{1064}^B 、 Q_{355}^E 和 Q_{1064}^E)。不考虑相对湿度对气溶胶的影响,单峰分布的气溶胶类型确定后,其复折射指数也就随之确定,在已知气溶胶谱分布和复折射指数的情况下,通过米散射理论正演计算出 3β 和 2α 。在反演过程中假设可能的气溶胶类型,在复折射指数矩阵中找到该类型气溶胶复折射指数相应的位置,通过初始值和之前正演计算得到的 5 个光学参量,并利用非线性拟合可以反演出气溶胶的粒子谱参数,具体的反演过程如图 2 所示。非线性拟合过程的表达式为

$$C = \sum_{i=1}^5 \omega_i [y_i - f_i(m, p)]^2, \quad (4)$$

式中 y_i 为正演计算的光学参量, $f_i(m, p)$ 为通过查算表计算的光学参量, C 为拟合函数值。进行 5 个变量 (β_{355} 、 β_{532} 、 β_{1064} 、 α_{355} 和 α_{532}) 的拟合,根据拟合结果输出谱分布参数。 N 、 σ 、 r_m 分别为对数正态分布的 3 个参数; ω_i 为权重函数,其大小与拟合量的平方成反比。

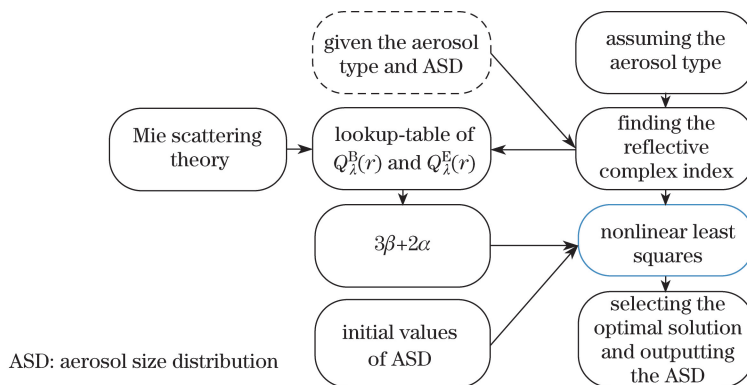


图 2 气溶胶谱分布反演流程

Fig. 2 Inversion process of aerosol spectrum distribution

4 模拟结果与误差分析

假设类沙尘型气溶胶为对数正态单峰分布,在波长 355,532,1064 nm 处的复折射指数(不考虑相对湿度的影响)如表 1 所示,具体的谱分布参数和拟合过程的输入值在表 3 中给出。在确定气溶胶类型以后,通过正演计算得到用于拟合的光学参量。由于水溶性气溶胶的复折射指数实部与类沙尘相近,所以反演过程中以水溶性气溶胶类型作为对照。当迭代结果达到最小并趋于稳定后(迭代 10 次左右)进行结果输出和保存,设置迭代次数大于 20。

表 4 中给出了具体的反演结果。从拟合的结果中可以看出:类沙尘气溶胶的反演结果明显好于水溶性气溶胶,不同初始值对拟合结果的影响非常小。在类沙尘气溶胶谱分布参数的反演结果中,三个参数的反演

表 3 参数设置

Table 3 Setting of parameters

Parameter	Given value		Input value	
	Dust-like		Dust-like	Water-soluble
m	1.53+0.008i;		1.525+0.008i	1.525+0.005i
	1.53+0.008i;		1.525+0.008i	1.525+0.006i
	1.52+0.008i;		1.525+0.008i	1.525+0.017i
N, σ, r_m	50.0, 1.5, 1.2		100.0, 1.0, 1.0	150.0, 1.5, 1.5

表 4 模拟反演结果

Table 4 Simulation inversion results

Value	Inversion result			
	Dust-like		Water-soluble	
Initial value (N, σ, r_m)	100.0, 1.0, 1.0	150.0, 1.5, 1.5	100.0, 1.0, 1.0	150.0, 1.5, 1.5
Cost function	0.028	0.029	0.892	0.658
Inversion value (N, σ, r_m)	50.02, 1.50, 1.20	50.01, 1.50, 1.20	-	-

误差分别为1.99%、1.55%和1.89%，并且不同的初始值对谱参数反演结果带来的差别也很小。粒子数浓度、几何标准偏差和峰值半径三个参数的相对误差分别为0.03%、0.01%和-0.03%。

在反演过程中,通过在已经建立好的复折射指数矩阵中找到相应的位置来确定复折射指数,复折射指数的不确定性势必会给反演结果带来影响。根据表3中给出的类沙尘型气溶胶,对其输入的复折射指数增加±1和±2步长范围的不确定性,以355 nm波长为例,其复折射指数实部增加不确定性后分别为1.500(-1),1.550(+1),1.475(-2),1.575(+2),其复折射指数虚部增加不确定性后分别为0.007(-1),0.009(+1),0.006(-2),0.010(+2),其他波长以此类推,具体的反演结果如图3所示。图3中上下两行分别代表实部和虚部,从左到右依次对应355,532,1064 nm 3个波长。由图3(a)~(c)可以看出,实部在波长1064 nm处的不确定性给反演结果带来的影响最大,其次是在波长532 nm处。在波长532 nm和1064 nm处,实部的不确定性越大,对反演结果的影响也会越大。在图3(d)~(f)中,波长355 nm和532 nm处虚部的不确定性越大,对反演结果的影响越大。总体上,与虚部相比,实部的不确定性对反演结果影响更大,说明在设置的复折射指数矩阵下,实部对反演结果更敏感。当实部和虚部都有±1步长的不确定性时,复折射指数给粒子数浓度、几何标准偏差和峰值半径3个参数带来的相对误差分别为20.32%、33.50%和24.72%;当实部和虚部都有±2步长的不确定性时,复折射指数给这3个参数带来的相对误差分别为76.53%、50.31%和47.81%,这表明复折射指数对于反演气溶胶谱参数尤为重要,其中实部比虚部贡献更大。

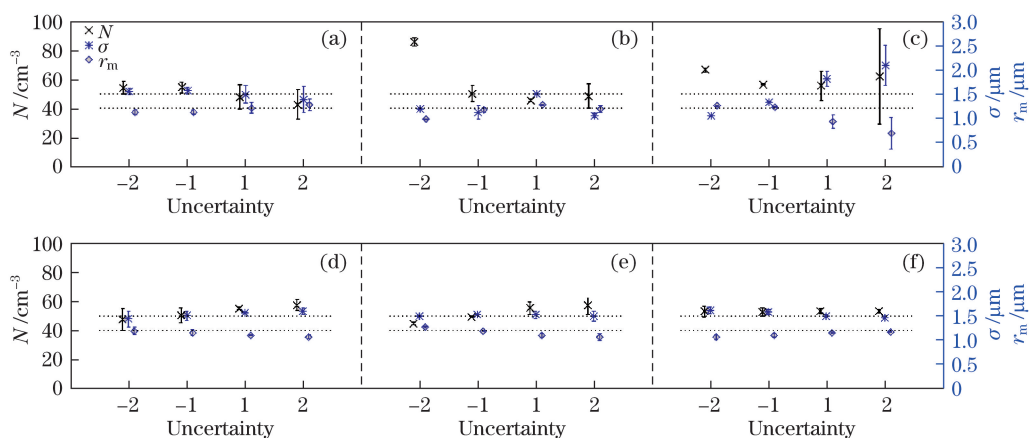


图 3 复折射指数的不确定性给反演结果带来的影响。(a) 355 nm 处的 m_r ; (b) 532 nm 处的 m_r ; (c) 1064 nm 处的 m_r ; (d) 355 nm 处的 m_i ; (e) 532 nm 处的 m_i ; (f) 1064 nm 处的 m_i

Fig. 3 Influence of complex refractive index uncertainty on inversion results. (a) m_r at 355 nm; (b) m_r at 532 nm; (c) m_r at 1064 nm; (d) m_i at 355 nm; (e) m_i at 532 nm; (f) m_i at 1064 nm

5 结 论

局地气溶胶观测与研究对于污染过程的分析往往不充分,激光雷达作为垂直观测手段,具有获取大气垂直廓线的能力,其获得的气溶胶微物理参数尤为重要。在此分析了气溶胶的主要类型及其组成成分,以及复折射指数对效率因子(Q_{532}^B 和 Q_{532}^E)的影响。对气溶胶谱为单峰分布的情况进行了模拟反演,并分析了复折射指数对反演结果的影响。

利用非线性拟合的方法模拟反演了气溶胶单峰谱分布参数,结果表明:初始值对于反演结果影响较小,粒子数浓度、几何标准偏差和峰值半径的反演结果较准确。复折射指数对气溶胶谱分布的反演很重要,当复折射指数的实部和虚部存在误差时,粒子数浓度、几何标准偏差和峰值半径 3 个参数反演的误差较大,并且复折射指数的误差越大,反演结果的误差也越大。相对于复折射指数的虚部,实部的误差贡献更大,这为激光雷达反演气溶胶谱分布垂直廓线的研究提供了基础。

气溶胶在大气中的分布形式往往比较复杂,为了更好地揭示大气气溶胶谱分布特征,进行双峰和三峰的谱分布反演是必要的,在气溶胶谱分布比较复杂的情况下,需要更多的参数来描述,反演的难度也会变大。研究稳定可行的谱分布反演算法是利用激光雷达获取气溶胶谱分布垂直廓线的重要过程。

致谢 感谢美国怀俄明大学大气科学系王志恩教授、邓敏老师对本研究的帮助。

参 考 文 献

- [1] Boucher O, Randall D, Artaxo P, *et al.* Clouds and aerosols[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 576-578.
- [2] Li Zhengqiang, Xu Hua, Zhang Ying, *et al.* Joint use of active and passive remote sensing for monitoring of severe haze pollution in Beijing 2013[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(4): 919-928.
李正强, 许华, 张莹, 等. 北京区域 2013 严重灰霾污染的主被动遥感监测[J]. 遥感学报, 2013, 17(4): 919-928.
- [3] Wang X, Chen J, Cheng T, *et al.* Particle number concentration, size distribution and chemical composition during haze and photochemical smog episodes in Shanghai[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(9): 1894-1902.
- [4] Bo Guangyu, Liu Dong, Wu Decheng, *et al.* Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0113001.
伯广宇, 刘东, 吴德成, 等. 双波长激光雷达探测典型雾霾气溶胶的光学和吸湿性质[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0113001.
- [5] Chen Qiufang, Sun Zai, Xie Xiaofang. Distribution of atmospheric ultrafine particles during haze weather in Hangzhou[J]. Environmental Science, 2014, 35(8): 2851-2856.
陈秋方, 孙在, 谢小芳. 杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 2851-2856.
- [6] Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, *et al.* The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 826-840.
石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 826-840.
- [7] Bo Guangyu, Li Aiyue, Xu Chidong. Remote sensing aerosol extinction hygroscopic growth factor and its wavelength dependence using lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0601003.
伯广宇, 李爱悦, 徐赤东. 激光雷达遥感地表气溶胶消光吸湿因子及其对波长的依赖特性[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0601003.
- [8] Bo Guangyu, Xie Chenbo, Wang Bangxin, *et al.* Case study of the relationship between aerosol Ångström exponent and relative humidity[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0713002.
伯广宇, 谢晨波, 王邦新, 等. 相对湿度影响地表气溶胶波长指数的个例研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0713002.
- [9] Müller D, Wandinger U, Althausen D, *et al.* Retrieval of physical particle properties from lidar observations of extinction and backscatter at multiple wavelengths[J]. Applied Optics, 1998, 37(12): 2260-2262.
- [10] Liu Dong, Tao Zongming, Wu Decheng, *et al.* Development of three-wavelength-Raman-polarization lidar system and case study[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0228001.
刘东, 陶宗明, 吴德成, 等. 三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0228001.
- [11] Tao Z, Liu D, Zhong Z, *et al.* Measurements of cirrus clouds with a three-wavelength lidar[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(5): 050101.
- [12] Ji Chengli, Tao Zongming, Hu Shunxing, *et al.* Cirrus measurement using three-wavelength lidar in Hefei[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0401001.
季承荔, 陶宗明, 胡顺星, 等. 三波长激光雷达探测合肥地区卷云特性[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0401001.
- [13] Tao Zongming, Liu Dong, Shi Bo, *et al.* Relationship between backscatter coefficient and wavelength of strong cirrus cloud based on a three-wavelength lidar measurements[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(8): 857-861.
陶宗明, 刘东, 史博, 等. 基于三波长激光雷达对强卷云后向散射系数波长关系研究[J]. 北京理工大学学报, 2013,

33(8): 857-861.

- [14] Tao Zongming, Liu Dong, Wei Heli, *et al.* The estimation of cirrus cloud particulate shape using combined simulation and a three-wavelength lidar measurement[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(3): 1739-1743.
陶宗明, 刘东, 魏合理, 等. 三波长激光雷达拟合卷云的粒子形状[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(3): 1739-1743.
- [15] Detlef M, Ulla W, Albert A. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: Theory[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(12): 2346-2357.
- [16] Veselovskii I, Kolgotin A, Griaznov V, *et al.* Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(18): 3685-3699.
- [17] Shifrin K S, Zolotov I G. The use of direct observations over the aerosol particle size distribution for inverting lidar data[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(10): 1411-1420.
- [18] Sitarek S, Stacewicz T, Posyniak M. Software for retrieval of aerosol particle size distribution from multiwavelength lidar signals[J]. *Computer Physics Communications*, 2016, 199: 53-60.
- [19] Jumelet J, Bekki S, David C, *et al.* Statistical estimation of stratospheric particle size distribution by combining optical modelling and lidar scattering measurements[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(17): 5435-48.
- [20] Junge C E. *Atmospheric chemistry: Advances in geophysics*[M]. New York: Academic Press, 1958: 63-88.
- [21] Deirmendjian D. Scattering and polarization properties of water clouds and hazes in the visible and infrared[J]. *Applied Optics*, 1964, 3(2): 187-196.
- [22] Pinnick R G, Rosen J M, Hofmann D J. Stratospheric aerosol measurements III: Optical model calculations[J]. *Atmospheric Sciences*, 1976, 33(2): 304-314.
- [23] Bohren C F, Huffman D R. *Absorption and scattering of light by small particles*[M]. New York: Wiley, 1983: 83-128.
- [24] D'Almeida G A, Koepke P, Shettle E P. *Atmospheric aerosols: Global climatology and radiative characteristics*[M]. Virginia: Deepak Publilshing, 1991: 25-31.
- [25] Kent G S, Yue G K, Farrukh U, *et al.* Modeling atmospheric aerosol backscatter at CO₂ laser wavelengths. 1: Aerosol properties, modeling techniques, and associated problems[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(11): 1655-1665.
- [26] Levoni C, Cervino M, Guzzi R, *et al.* Atmospheric aerosol optical properties a database of radiative characteristics for different components and classes[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(30): 8031-41.