

# 基于 OPAC 的典型环境中气溶胶组分的光学特性分析

王金虎<sup>1a,1b,1c,2</sup>, 张炎<sup>1a,1b</sup>, 陈钟荣<sup>1a,1b</sup>, 陈浩<sup>1a,1b</sup>, 金子琪<sup>1a,1b</sup>, 王靓<sup>1a,1b</sup>, 马晓峰<sup>1a,1b</sup>

(1.南京信息工程大学 a.气象灾害预报预警与评估协同创新中心;

b.中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室;c.大气科学与环境气象国家级实验教学示范中心,南京 210044;2.中国科学院 中层大气和全球环境探测重点实验室,北京 100029)

**摘要:**利用基于 Mie 散射理论的云和气溶胶粒子的光学特性软件(OPAC)在不同激光雷达探测波段对一般大陆(典型气溶胶组分:水溶性、不溶性和烟尘气溶胶)、沙漠(典型气溶胶组分:水溶性、核模态矿物、积聚模态矿物和粗模态矿物气溶胶)和洁净海洋(典型气溶胶组分:水溶性、积聚模态海盐和粗模态海盐)3 种环境下的气溶胶光学参数(散射系数、光学厚度和激光雷达比)进行了仿真研究,分析了各环境中光学参数随气溶胶组分浓度的变化规律以及各组分对光学特性的影响.结果表明消光系数和光学厚度在不同激光波段、不同环境下均随组分浓度线性递增,在上述环境中对消光系数和光学厚度影响最大的组分依次为水溶性气溶胶、积聚模态矿物气溶胶和积聚模态海盐气溶胶.激光雷达比变化规律十分复杂,受探测波长及气溶胶组分的双重影响,一般大陆环境中非水溶性气溶胶在 2 个波段上的影响占主导地位;沙漠环境中,不同波段上积聚模态矿物气溶胶对激光雷达比的影响最大;洁净海洋环境中,积聚模态海盐气溶胶对激光雷达比的影响最强.

**关键词:**消光系数;光学厚度;激光雷达比;Mie 散射;OPAC 软件包

**中图分类号:**P407.5

**文献标志码:**A

大气气溶胶是指悬浮在大气中的直径在 0.001~100  $\mu\text{m}$  的液体或固体微粒体系<sup>[1]</sup>,气溶胶不仅可以通过散射和吸收太阳辐射、作为云凝结核改变云的微物理特征来影响地气系统的辐射收支平衡,进而对区域和全球气候产生影响<sup>[2-9]</sup>;还可参与云雾降水及各种大气光、电、化学过程,对人体和其他生物的健康带来危害并产生一系列的环境问题,如臭氧层的破坏和光化学烟雾的形成<sup>[10-11]</sup>.另外,准确获得大气气溶胶粒子的光学特性也是计算气溶胶辐射强迫和估算气溶胶气候效应的基础<sup>[12]</sup>.因此,气溶胶的光学特性研究一直是国内外研究的重点<sup>[13]</sup>.

气溶胶的探测手段主要有卫星被动遥感和激光雷达主动遥感.其中,激光雷达是一种主动式现代光学遥感设备,具有高分辨率、高亮度性、高单色性、高相干性和高方向性等特点,已经成为对海洋和陆地气溶胶进行高精度遥感探测的有效手段<sup>[14-16]</sup>.Mie 散射激光雷达是最常见的一种将气溶胶光学特性作为主要探测对象<sup>[17]</sup>的激光雷达,主要工作在 532 nm 和 1 064 nm 波段<sup>[18]</sup>.目前国内研究多基于 Mie 散射激光雷达来探测气溶胶的光学特性<sup>[19]</sup>,取得许多研究成果.石广玉等<sup>[20]</sup>使用名古屋大学的 Mie 散射激光雷达观测了拉萨上空的气溶胶,发现 20~30 km 的平流层存在颗粒物,其浓度、粒径和分布呈现较大不均匀性,得到了拉萨上空气溶胶的整体光学特性,但未能明确具体气溶胶组分对整体光学特性的作用.李礼等<sup>[21]</sup>利用偏振 Mie 散射激光雷达,对重庆主城区 2009 年的一次典型灰霾天气进行连续气溶胶观测,发现重庆冬季典型灰霾天气下的光学厚度(AOD)值在 4 以上.虽然分析后认为是由人为排放的废气及颗粒物综合作用所致,但未能指出

**收稿日期:**2018-09-12;**修回日期:**2019-01-17.

**基金项目:**国家自然科学基金(61372066;61672149;41075025);2017 年度江苏省自然科学基金项目(BK20170945);中国博士后科学基金第 63 批面上资助(2018M631554);2016 年南京信息工程大学人才启动经费资助项目(2016r028);2018 年江苏省研究生实践创新计划资助(SJ CX18\_0322);南京信息工程大学大学生创业训练计划项目(201810300105T;201910300152E).

**作者简介(通信作者):**王金虎(1987-),男,江苏南通人,南京信息工程大学校聘副教授,博士,硕士生导师,主要从事毫米波雷达系统、粒子散射理论计算与测量以及微波遥感的研究,E-mail:goldtigerwang@nuist.edu.cn.

具体气溶胶组分对 AOD 的影响性。邱金恒等<sup>[22]</sup>于 2000 年在北京利用多波长激光雷达探测在北京上空 6 km 处探测到了气溶胶粒子层,但是仅估计了该气溶胶层的来源是沙尘,未能确定影响光学参数的确切气溶胶组分。也有学者分析过不同类型气溶胶在气溶胶混合体中的光学参数分量,如曹念文等<sup>[23]</sup>通过改进 Mie 散射激光雷达常用的 Klett 和 Fernald 反演法,克服了传统方法只能反演一种类型气溶胶光学参数的缺点,成功对背景气溶胶和云 2 种气溶胶的光学参数进行了分类。但这种分类仍然十分粗略,仅可区分云和背景气溶胶,无法进一步细化各气溶胶组分的个体影响。

综上所述,目前基于 Mie 散射激光雷达研究气溶胶时,通常只分析该环境下所有气溶胶组分集合的光学特性,对环境中每种气溶胶组分的光学特性影响并不明确,针对不同气溶胶环境、不同探测波段上单一气溶胶组分的光学特性分析缺少理论研究。因此,本文利用基于 Mie 散射的 OPAC 软件包,分析了激光雷达探测气溶胶时不同环境中各种气溶胶组分对光学特性的影响,并进一步对比了 3 种波长下的变化规律。该研究对于阐明 Mie 散射激光雷达探测气溶胶的光学特性、合理设计和选择激光雷达系统、分析现有 Mie 散射激光雷达在不同工作环境下的性能具有重要的研究意义。

## 1 仿真原理

### 1.1 OPAC 软件包

本文的仿真实验具体利用 OPAC 软件包实现。它是由德国慕尼黑大学和马克斯普朗克气象学研究所(MPD)联合开发的气溶胶与云光学特性程序包。此软件包中的气溶胶基本组分是基于全球气溶胶数据集<sup>[24]</sup>(GADS)修改而来。OPAC 内置有 10 种气溶胶在 8 种相对湿度条件下的微物理和光学特性数据,模拟波长范围为 0.25~40  $\mu\text{m}$ 。它利用气溶胶粒子的粒子谱分布和光谱反射率,假设气溶胶粒子为球形,基于 Mie 散射理论模拟气溶胶粒子的散射,最终计算出气溶胶的光学特性<sup>[25]</sup>,共提供 16 种不同的光学参数给使用者自行选择。此外,根据实际情况,OPAC 还可以计算不同气溶胶成分外混合得到的光学特性<sup>[26]</sup>。

### 1.2 粒子谱分布函数及廓线函数

研究中涉及的气溶胶颗粒物,其谱分布满足对数正态分布<sup>[12]</sup>

$$\frac{dN_i(r)}{dr} = \frac{N_i}{\sqrt{2\pi r} \lg \sigma_i \ln 10} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\lg r - \lg r_{\text{mod } N, i}}{\lg \sigma_i} \right)^2 \right], \quad (1)$$

其中,  $r_{\text{mod } N, i}$  是组分  $i$  的模半径,  $\sigma_i$  是谱分布宽度,  $N_i$  是组分  $i$  的粒子数浓度。

由于气溶胶光学厚度的计算需要气溶胶粒子数浓度的垂直分布,但是通常缺乏相关的观测资料,所以实验中利用气溶胶浓度的垂直廓线和实际观测的地面浓度资料,推导得到气溶胶数浓度的垂直分布

$$N(h) = N(0) e^{-\frac{h}{Z}}, \quad (2)$$

其中,  $h$  代表离地高度,  $Z$  是大气标高,它随气溶胶环境类型变化,  $N(0)$  是地表气溶胶数浓度。由廓线函数公式,通过对地面气溶胶浓度积分算出其柱浓度<sup>[27]</sup>。

### 1.3 光学参数计算

激光雷达常用的光学参数分别为消光系数  $\sigma_e$ 、光学厚度  $\tau$  和激光雷达比  $L$ 。根据 Mie 散射理论,由气溶胶的谱分布函数及其折射率,即可计算气溶胶的消光系数<sup>[28]</sup>

$$\sigma_e = \pi \int Q_{\text{ext}}(m, r, \lambda) n(r) r^2 dr, \quad (3)$$

其中,  $Q_{\text{ext}}$  是折射率  $m$ , 粒子半径  $r$  和波长  $\lambda$  的函数, 谱函数  $n(r)$  满足对数正态分布。由已知气溶胶的折射率  $m$ , 可算得消光系数。光学厚度  $\tau$  由气溶胶消光系数  $\sigma_e$  及高度廓线  $N(h)$  计算而得

$$\tau = \sum_j \int_{H_{j, \min}}^{H_{j, \max}} \sigma_{e, j}(h) dh = \sum_j \sigma_{e, j}^1 N_j(0) \int_{H_{j, \min}}^{H_{j, \max}} e^{-\frac{h}{Z_j}} dh. \quad (4)$$

仿真实验中,将大气分为气溶胶混合层、矿物输送层、自由对流层和平流层 4 层。(4)式中,  $\sigma_{e, j}^1$  是  $j$  层大气对应的单位体积下气溶胶的消光系数,  $h$  代表离地高度,  $Z_j$  是  $j$  层大气对应的大气标高,  $N_j(0)$  是  $j$  层大气对应的层底气溶胶数浓度。激光雷达比由下式计算

$$L = \sigma_e / p_{180}, \quad (5)$$

其中,  $p_{180}$  为方位角  $180^\circ$  处的散射系数(即后向散射系数).

## 2 仿真方法

为研究激光雷达波长下各典型气溶胶环境中气溶胶组分数浓度变化对光学参数的贡献及影响,本文选定 OPAC 提供的一般大陆、沙漠和洁净海洋 3 种典型气溶胶环境进行仿真计算分析,气溶胶组分数浓度如表 1 所示.

表 1 3 种典型气溶胶环境的组分及默认数浓度

Tab.1 Composition and default concentration of 3 typical aerosol environments

气溶胶环境	组分	粒子数浓度/( $\text{cm}^{-3}$ )	组分粒子数浓度/所有粒子数浓度
一般大陆	所有粒子	15 300.0	1
	水溶性	7 000.0	0.457 516 3
	非水溶性	0.4	0.000 026 1
	煤烟	8 299.6	0.542 457 5
沙漠	所有粒子	2 300.000	1
	水溶性	1 999.858	0.869 503 5
	矿物(核模态)	269.500	0.117 173 9
	矿物(积聚模态)	30.500	0.013 260 9
洁净海洋	所有粒子	1 520.000 0	1
	水溶性	1 499.996 8	0.986 840 0
	海盐(积聚模态)	20.000 0	0.013 157 9
	海盐(粗模态)	0.003 2	0.000 002 1

针对每种典型气溶胶环境,采用外混合法依次改变一种气溶胶组分的数浓度,以其环境默认数浓度为基准,控制其数浓度从默认值的 10% 开始,依次增加 10%,直至环境默认值的 200% 结束.具体实验步骤为:在一般大陆型气溶胶环境中,以表 1 所列各组分的数浓度为基准,分别改变水溶性气溶胶数浓度  $700 \text{ cm}^{-3}$  至  $14\ 000 \text{ cm}^{-3}$  (间隔为  $700 \text{ cm}^{-3}$ ),非水溶性气溶胶数浓度  $0.04 \text{ cm}^{-3}$  至  $0.8 \text{ cm}^{-3}$  (间隔为  $0.04 \text{ cm}^{-3}$ ),烟尘气溶胶数浓度  $830 \text{ cm}^{-3}$  至  $16\ 600 \text{ cm}^{-3}$  (间隔为  $830 \text{ cm}^{-3}$ ),计算 50% 相对湿度下,550 nm 和 1 000 nm 波段上的消光系数、光学厚度及激光雷达比;在沙漠型气溶胶环境中,分别改变水溶性气溶胶数浓度  $200 \text{ cm}^{-3}$  至  $4\ 000 \text{ cm}^{-3}$  (间隔为  $200 \text{ cm}^{-3}$ ),核模态矿物气溶胶数浓度  $27 \text{ cm}^{-3}$  至  $54 \text{ cm}^{-3}$  (间隔为  $27 \text{ cm}^{-3}$ ),积聚模态矿物气溶胶数浓度  $3 \text{ cm}^{-3}$  至  $60 \text{ cm}^{-3}$  (间隔为  $3 \text{ cm}^{-3}$ ),因粗模态矿物气溶胶的数浓度与环境总数浓度数量级相差较大,所以视为微量气溶胶组分,仿真中不予考虑.由此计算 50% 相对湿度下 550 nm 和 1 000 nm 波段上的消光系数、光学厚度及激光雷达比;在洁净海洋型气溶胶环境中,分别改变水溶性气溶胶数浓度  $150 \text{ cm}^{-3}$  至  $3\ 000 \text{ cm}^{-3}$  (间隔为  $150 \text{ cm}^{-3}$ ),积聚模态海盐气溶胶数浓度  $2 \text{ cm}^{-3}$  至  $40 \text{ cm}^{-3}$  (间隔为  $2 \text{ cm}^{-3}$ ),因为粗模态海盐气溶胶的数浓度与环境总数浓度数量级相差较大,所以视为微量气溶胶组分,仿真中不予考虑,由此分别计算 50% 相对湿度下 550 nm 和 1 000 nm 波段上的消光系数、光学厚度及激光雷达比.

利用 OPAC 软件计算不同波长下各环境中对应的光学参数,OPAC 的 Fortran 软件包包含 3 部分:输入文件“OPAC.inp”、主程序文件“OPAC.f”和输出文件“OPAC.out”.输出文件主要包含了该气溶胶环境中,所有组分的混合体于规定相对湿度下,在不同激光波段上的消光系数、光学厚度和激光雷达比.这些光学参数的通用计算流程如图 1 所示.

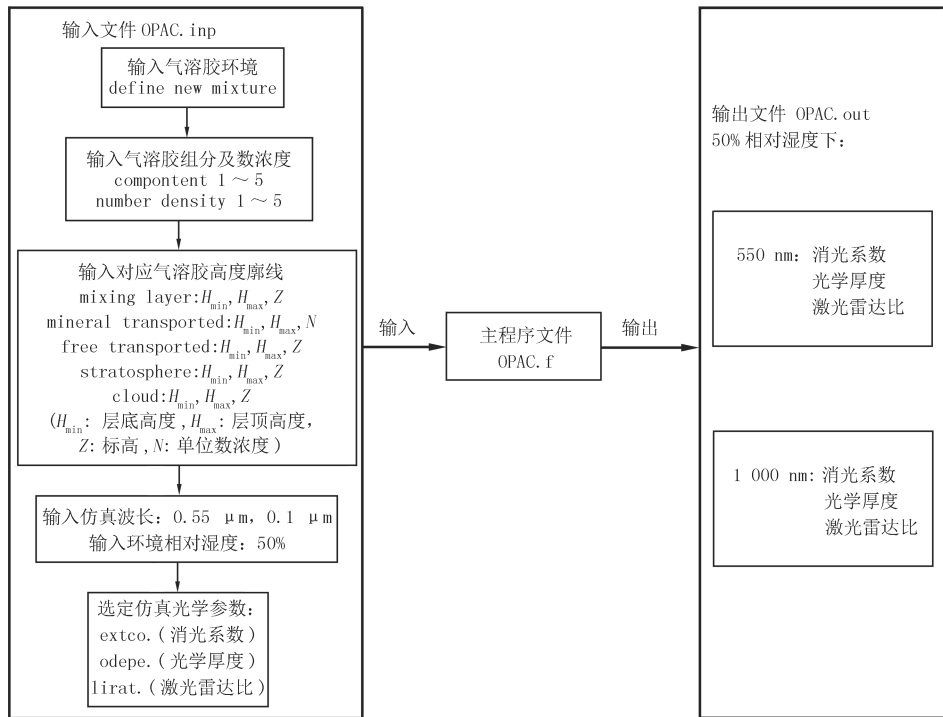


图1 OPAC 仿真气溶胶光学特性流程

Fig. 1 Flow diagram of simulation of aerosol optical characteristics based on OPAC

### 3 结果与讨论

#### 3.1 消光系数

一般大陆型、沙漠型和洁净海洋型 3 种典型环境中消光系数在 2 个激光波段上随组分数浓度的变化情况分别如图 2~4 所示。结果表明在 3 种典型环境中, 2 个波段上的消光系数均随组分数浓度呈线性递增变化。对图 2 分析可知, 在一般大陆型气溶胶环境中, 3 种组分在 550 nm 及 1 000 nm 波段引起的消光系数变化幅度分别为: 17.8% 和 18% (煤烟), 6.9% 和 31.3% (非水溶性), 164.7% 和 140.7% (水溶性)。因此, 一般大陆型气溶胶环境中, 在 2 个激光波段上均是水溶性气溶胶对消光系数的影响最大, 非水溶性气溶胶和煤烟的影响相对较小。由图 3 可知, 在沙漠型气溶胶环境中, 3 种组分在 550 nm 及 1 000 nm 波段引起的消光系数变化幅度分别为: 17.4% 和 6.2% (水溶性), 26.8% 和 13.1% (核模态矿物), 128.7% 和 150.6% (积聚模态矿物)。因此, 沙漠型气溶胶环境中, 在 2 个激光波段上均是水溶性和核模态矿物气溶胶对消光系数的影响相对较小, 积聚模态矿物气溶胶的影响占主导地位。由图 4 可知, 在洁净海洋型气溶胶环境中, 2 种组分在 550 nm 及 1 000 nm 波段引起的消光系数变化幅度分别为: 30% 和 12.1% (水溶性), 159.2% 和 175.8% (积聚模态海盐)。因此, 洁净海洋型气溶胶环境中, 在 2 个激光波段上均是水溶性气溶胶对消光系数的影响相对较小, 积聚模态海盐气溶胶的影响占主导地位。

#### 3.2 光学厚度

一般大陆型、沙漠型和洁净海洋型 3 种典型环境中光学厚度在 2 个激光波段上随组分数浓度的变化情况如图 5~7 所示。结果显示, 在 3 种典型环境中, 2 个波段上的光学厚度均随组分数浓度呈线性递增变化。由图 5 分析可知, 在一般大陆型气溶胶环境中, 3 种组分在 550 nm 及 1 000 nm 波段引起的光学厚度变化幅度分别为: 14.7% 和 14.9% (煤烟), 5.8% 和 26.6% (非水溶性), 138.6% 和 118.9% (水溶性)。因此, 一般大陆型气溶胶环境中, 在 2 个激光波段上均是水溶性气溶胶对消光系数的影响最大, 非水溶性气溶胶和煤烟的影响相对较小。由图 6 可知, 在沙漠型气溶胶环境中, 3 种组分在 550 nm 及 1 000 nm 波段引起的光学厚度变化幅度分别为: 16.8% 和 6.8% (水溶性), 25.2% 和 12.7% (核模态矿物), 123.7% 和 148.5% (积聚模态矿物)。沙漠

型气溶胶环境中,在 2 个激光波段上均是水溶性和核模态矿物气溶胶对光学厚度的影响相对较小,积聚模态矿物气溶胶的影响占主导地位.由图 7 可知,在洁净海洋型气溶胶环境中,2 种组分在 550 nm 及 1 000 nm 波段引起的光学厚度变化幅度分别为:22.4%和 10.5%(水溶性),118.1%和 153.6%(积聚模态海盐).因此,洁净海洋型气溶胶环境中,在 2 个激光波段上均是水溶性气溶胶对光学厚度的影响相对较小,积聚模态海盐气溶胶的影响占主导地位.

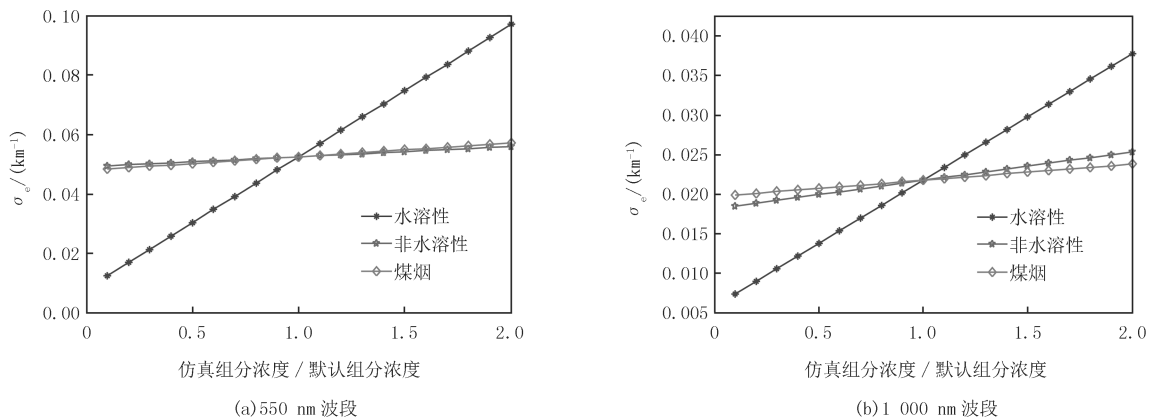


图 2 一般大陆型气溶胶环境

Fig.2 General continental aerosol environment

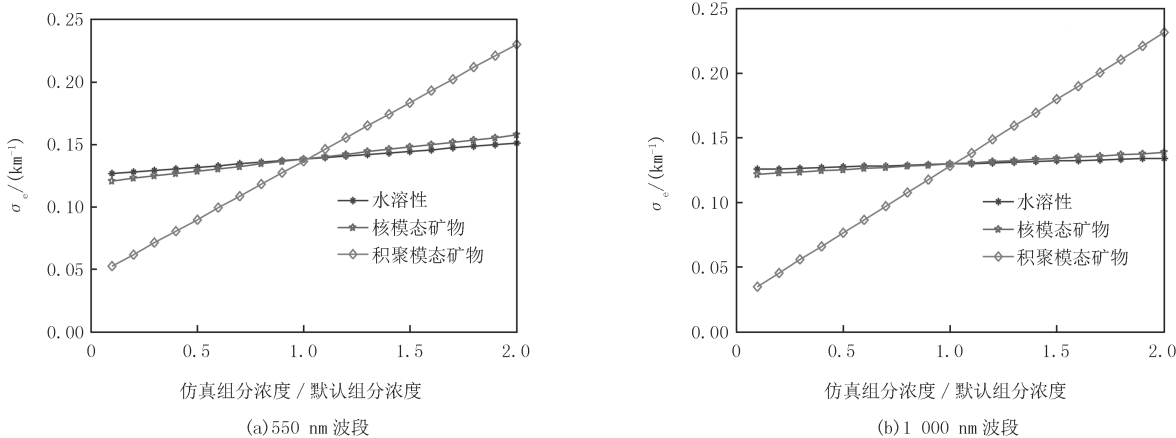


图 3 沙漠型气溶胶环境

Fig.3 Desert aerosol environment

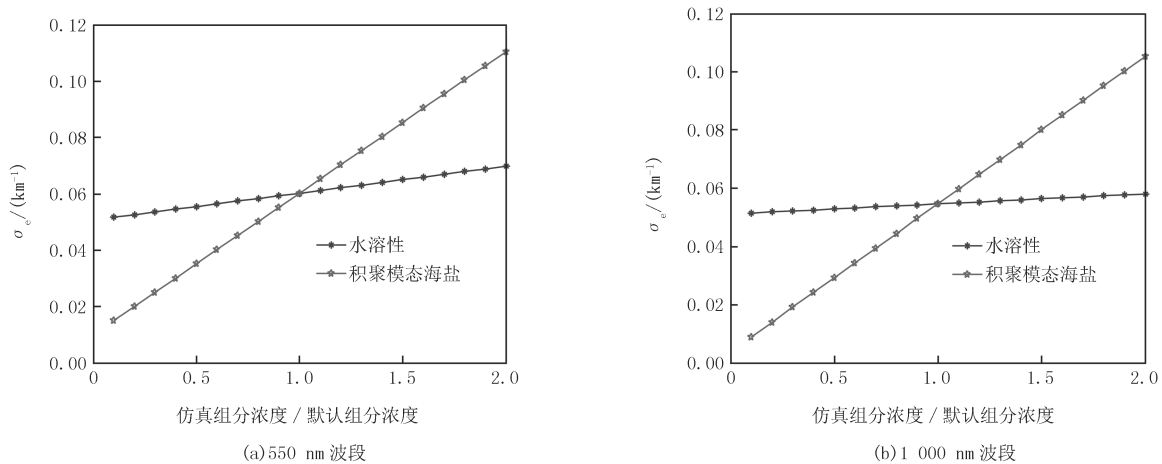


图 4 洁净海洋型气溶胶环境

Fig.4 Clean oceanic aerosol environment



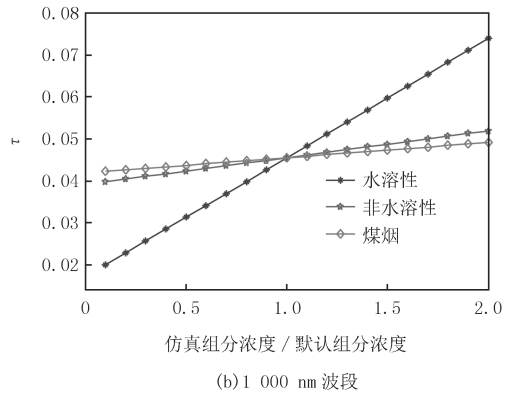
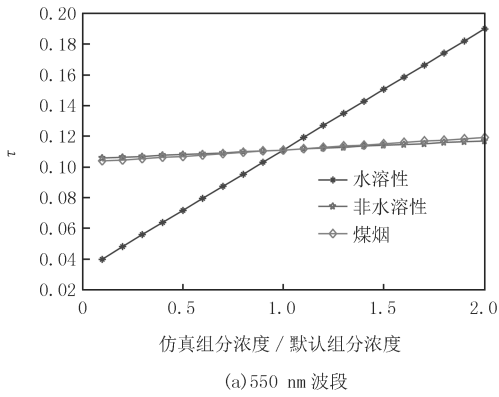


图5 一般大陆型气溶胶环境

Fig.5 General continental aerosol environment

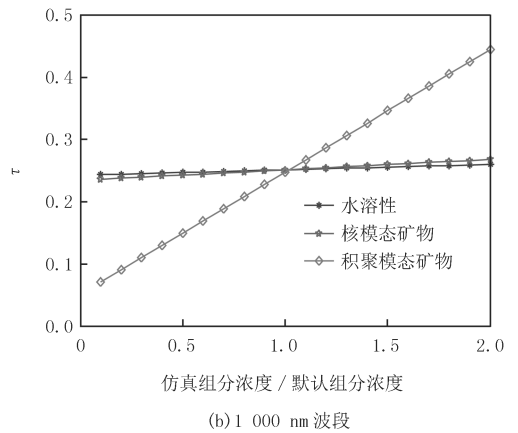
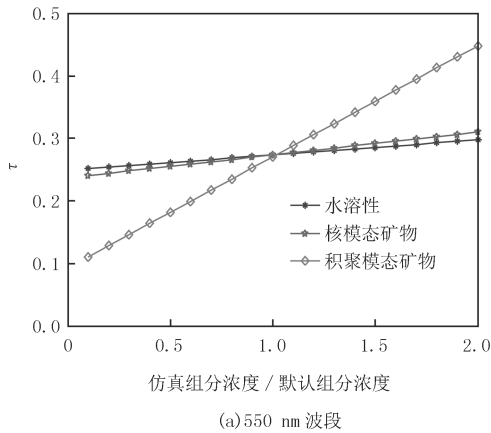


图6 沙漠型气溶胶环境

Fig.6 Desert aerosol environment

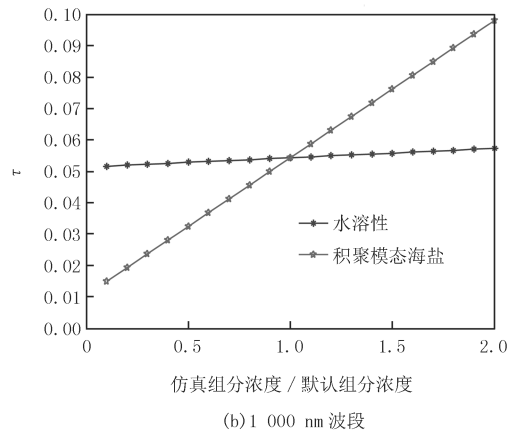
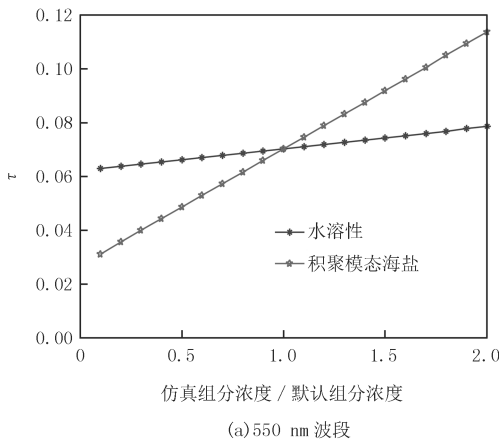


图7 洁净海洋型气溶胶环境

Fig.7 Clean oceanic aerosol environment

### 3.3 激光雷达比

一般大陆型、沙漠型和洁净海洋型3种典型环境中激光雷达比在2个波段上随组分数浓度的变化情况如图8~10所示。激光雷达比在3种环境中随组分数浓度的变化规律较为复杂。对图8分析可知,在一般大陆型气溶胶环境中,激光雷达比在2个波段上均随煤烟和非水溶性气溶胶数浓度分别线性递增和递减,但随水溶性气溶胶数浓度对数递增,而且当水溶性气溶胶数浓度小于环境默认值时递增速度快,大于默认值时递增速度减慢。对于激光雷达比的变化幅度,在550 nm和1000 nm波段上分别为7%和12.6%(煤烟)、8%和26%(非水溶性)、1.9%和18.8%(水溶性)。因此,在一般大陆型气溶胶环境中,在550 nm和1000 nm波段

上对激光雷达比的影响最大的均是非水溶性气溶胶.对图 9 分析可知,在沙漠型气溶胶环境中,激光雷达比在 2 个波段上均随水溶性及核模态矿物气溶胶数浓度线性递增,其随积聚模态矿物气溶胶指数递减.对于激光雷达比的变化幅度,在 550 nm 和 1 000 nm 波段上分别为 16.8%和 6.8%(水溶性),25.2%和 12.7%(核模态矿物),123.7%和 148.5%(积聚模态矿物).在沙漠型气溶胶环境中,在 550 nm 和 1 000 nm 波段上对激光雷达比的影响最大的均是积聚模态矿物气溶胶.对图 10 分析可知,在洁净海洋型气溶胶环境中,激光雷达比在 2 个波段上均随水溶性气溶胶数浓度线性递增,但随积聚模态海盐气溶胶数浓度在 550 nm 波段上指数递减,在 1 000 nm 波段上对数递增.就激光雷达比的变化幅度而言,在 550 nm 和 1 000 nm 波段上分别为 22.4%和 10.5%(水溶性),118.1%和 153.6%(积聚模态海盐).因此,在洁净海洋型气溶胶环境中积聚模态海盐对激光雷达比的影响最大.

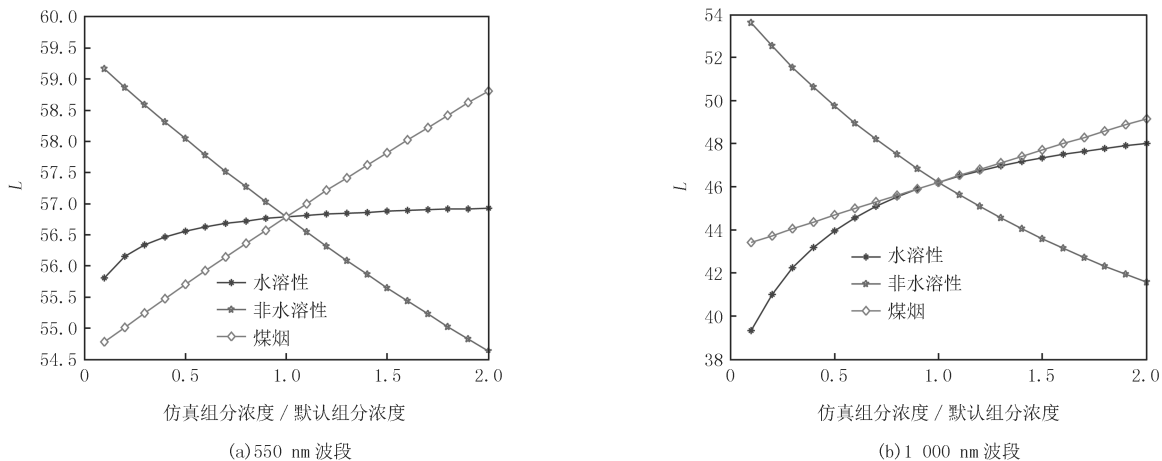


图 8 一般大陆型气溶胶环境

Fig.8 General continental aerosol environment

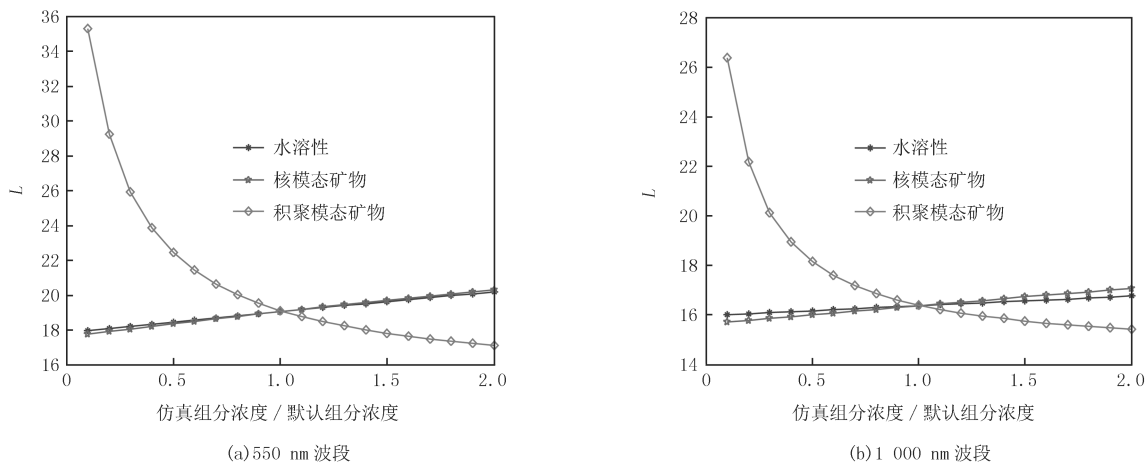


图 9 沙漠型气溶胶环境

Fig.9 Desert aerosol environment

### 4 结 论

本文基于 Mie 散射的 OPAC 软件包计算分析了 550 nm 和 1 000 nm 波段上一般大陆、沙漠和洁净海洋 3 种典型气溶胶环境中各组分浓度对 Mie 散射激光雷达光学参数的影响.

1)对于消光系数和光学厚度而言,它们在任一气溶胶环境的任一激光波段上都与组分数浓度满足良好的线性递增关系,但每种气溶胶环境中都存在一种组分对消光系数和光学厚度的影响远大于其他组分.该组分在一般大陆环境中为水溶性气溶胶,在沙漠环境中为积聚模态矿物气溶胶,在洁净海洋环境中为积聚模态

## 海盐气溶胶.

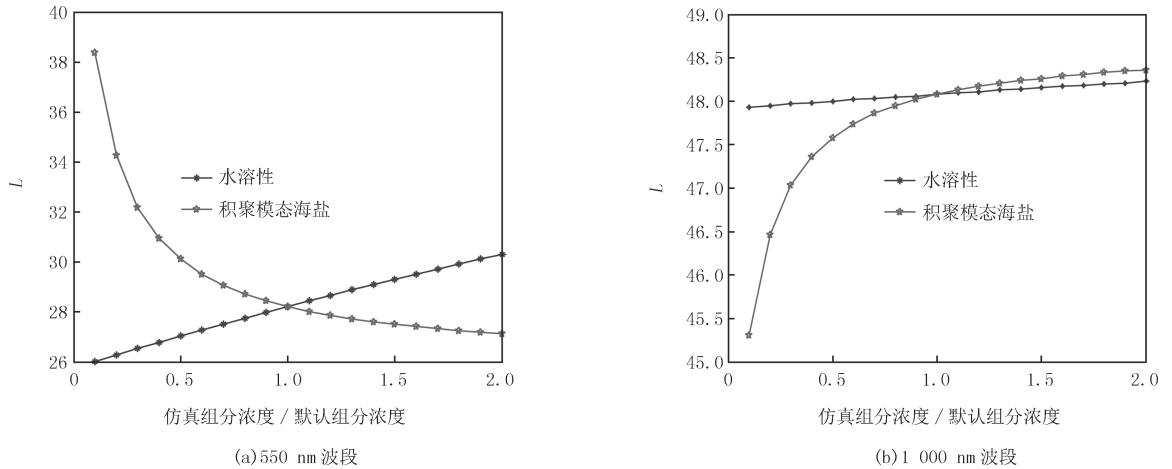


图10 洁净海洋型气溶胶环境

Fig.10 Clean oceanic aerosol environment

2)激光雷达比在各环境下随组分数浓度的变化规律较为复杂,组分类型和探测波长都会对其产生影响.对于一般大陆环境,在2个波段上激光雷达比均随煤烟数浓度线性递增,随非水溶性气溶胶数浓度线性递减,随水溶性气溶胶数浓度对数递增,且一般大陆环境中对激光雷达比影响最大的组分是非水溶性气溶胶;对于沙漠环境,在2个波段上激光雷达比均随水溶性及核模态矿物气溶胶线性递增,随积聚模态矿物气溶胶指数递减,且沙漠环境中对激光雷达比影响最大的组分为积聚模态矿物气溶胶;对于洁净海洋环境,在2个波段上激光雷达比均随水溶性气溶胶线性递增,但在1000 nm上它随积聚模态海盐气溶胶对数递增,在550 nm波段上指数递减,且洁净海洋环境中对激光雷达比影响最大的组分为积聚模态海盐气溶胶.

## 参 考 文 献

- [1] 韩永,王体健,饶瑞中,等.大气气溶胶物理光学特性研究进展[J].物理学报,2008(11):7396-7407.
- [2] 宿兴涛,王汉杰,宋帅,等.近10年东亚沙尘气溶胶辐射强迫与温度响应[J].高原气象,2011,30(5):1300-1307.
- [3] 岳治国,刘晓东,梁谷.气溶胶对北京地区不同类型云降水影响的数值模拟[J].高原气象,2011,30(5):1356-1367.
- [4] 曹贤洁,张镭,李霞,等.张掖地区气溶胶吸收和散射特性分析[J].高原气象,2010,29(5):1246-1253.
- [5] 田磊,张武,史晋森,等.河西春季沙尘气溶胶粒子散射特性的初步研究[J].高原气象,2010,29(4):1050-1057.
- [6] 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(4):826-840.
- [7] Haywood J, Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review[J]. Rev Geophys, 2000, 38(4):5413-543.
- [8] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J L, et al. Aerosol, climate, and hydrological cycle[J]. Science, 2001, 294(5549):2119-2124.
- [9] Kaufman Y J, Boucher O, Tanré D, et al. Aerosol anthropogenic component estimated from satellite data[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(17):L17804.
- [10] 周碧,张镭,曹贤洁,等.利用激光雷达资料分析兰州远郊气溶胶光学特性[J].高原气象,2011,30(4):1011-1017.
- [11] 汪安璞.大气气溶胶研究新动向[J].环境化学,1999(01):10-15.
- [12] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1998, 79(5):831-844.
- [13] 刘思含,周春艳,毛学军,等.大气气溶胶主被动遥感探测应用技术进展[J].环境与可持续发展,2016,41(4):131-135.
- [14] 马井会,张华,郑有飞,等.沙尘气溶胶光学厚度的全球分布及分析[J].气候与环境研究,2007(2):156-164.
- [15] Zhou J, Yu G M, Jin C J, et al. Lidar observation of Asian dust over Hefei, China, in spring 2000[J]. J Geophys Res, 2002, 107(D15):4252-4259.
- [16] Matthis V, Freudenthaler V, Amodeo A, et al. Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET Project: 1. Instruments[J]. Appl Opt, 2004, 43(4):961-976.
- [17] 夏俊荣,张镭. Mie 散射激光雷达探测大气气溶胶的进展[J].干旱气象,2006(4):68-72.
- [18] 徐青山,胡欢陵,魏合理.地基消光测量确定大气气溶胶模型[J].强激光与粒子束,2006(9):1451-1456.



- [19] 白宇波,石广玉,田村耕一,等.拉萨上空大气气溶胶光学特性的激光雷达探测[J].大气科学,2000(4):559-567.
- [20] 邱金桓,郑斯平,黄其荣,等.北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测[J].大气科学,2003(1):1-7.
- [21] 张金业,龚威,黄楚云,等.Raman 激光雷达探测气溶胶光学特性[J].光子学报,2010,39(7):1340-1344.
- [22] 李礼,杨灿,余家燕,等.重庆典型灰霾天气下大气气溶胶的激光雷达探测[J].环境科学与管理,2012,37(1):143-146.
- [23] 曹念文,颜鹏.基于激光雷达探测的气溶胶分类方法研究[J].光学学报,2014,34(11):28-34.
- [24] Koepke P, Hess M, Schult I, et al. Global Aerosol Data Set. Report No.243[EB/OL].[2018-08-25].[https://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/MPI-Report\\_243.pdf](https://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/MPI-Report_243.pdf).
- [25] HAYWOOD J, BOUCHER O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review [J]. Rev Geophys, 2000, 38 (4): 513-543.
- [26] 黄为,李正强,谢一淦,等.2015年世界田联赛期间北京地区气溶胶成分遥感分析[J].中国环境监测,2017,33(2):158-164.
- [27] 田军,王体健,庄炳亮,等.南京北郊黑碳气溶胶的浓度观测及辐射强迫研究[J].气候与环境研究,2013,18(5):662-670.
- [28] 李学彬,徐青山,魏合理,等.气溶胶消光系数与质量浓度的相关性研究[J].光学学报,2008(9):1655-1658.

## Analysis of the optical properties of aerosol components in typical environments based on OPAC

Wang Jinhui<sup>1a,1b,1c,2</sup>, Zhang Yan<sup>1a,1b</sup>, Chen Zhongrong<sup>1a,1b</sup>, Chen Hao<sup>1a,1b</sup>,  
Jin Ziqi<sup>1a,1b</sup>, Wang Liang<sup>1a,1b</sup>, Ma Xiaofeng<sup>1a,1b</sup>

(1.a.Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters;

b.Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration;c.National

Demonstration Center for Experimental Atmospheric Science and Environmental Meteorology Education, Nanjing

University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The optical properties of aerosol and cloud software package (OPAC) was used to study the effects of different lidar detection bands in three typical environments, which include continental average (typical aerosol components: water-soluble, insoluble and soot aerosols), desert (typical aerosol components: water-soluble, nuclear-mode minerals, accumulative mode minerals and coarse-mode minerals) and clean ocean (typical aerosol components: water-soluble, accumulated mode sea salt and coarse mode sea salt) under the Mie scattering theory. The variation of optical parameters with the concentration of components under each environment and the influence of each component on the optical properties were analyzed. The results showed that the extinction coefficient and optical thickness increased linearly with the concentration of the components at different laser bands and under different environments. The components that had the greatest influence on the extinction coefficient and optical thickness in the above environments were successively water-soluble aerosols, mineral aerosols of accumulation mode and sea salt aerosols of accumulation mode. The variation of the lidar ratio is very complex, which is affected by the dual influence of detection wavelength and aerosol component. In general, non-water-soluble aerosols under continental average environment has the greatest influence on the lidar ratio at 550nm and 1 000 nm. The minerals of accumulative mode in different wave bands has the greatest influence on the lidar ratio under desert environment. The sea salts of accumulative mode has the strongest influence on the lidar ratio under clean marine environment.

**Keywords:** extinction coefficient; optical thickness; lidar ratio; Mie scattering theory; OPAC software package

[责任编辑 杨浦 王凤产]