

## 激光与光电子学进展

## 海洋大气气溶胶复折射率反演方法研究

刘蒙磊<sup>1,2</sup>, 李学彬<sup>2\*</sup>, 陈杰<sup>2,3</sup>, 王菲菲<sup>2,3</sup>, 罗涛<sup>2</sup>, 崔生成<sup>2</sup>, 张梓晗<sup>2</sup>, 刘强<sup>2</sup><sup>1</sup>安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601;<sup>2</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;<sup>3</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031

**摘要** 为了研究海洋大气气溶胶不同模态的光学特性,基于球形粒子的 Mie 散射理论,综合运用能见度仪、自动气象站、光学粒子计数器(OPC)以及腔衰减相移式单散射反照率监测仪(CAPS)等设备,对广东茂名地区近海海域的大气气溶胶进行粗、细模态分类以及复折射率反演和研究。反演结果表明,在 530 nm 处,细模态气溶胶复折射率在相对湿度大于 55% 时约为  $1.35(\pm 0.01)-0.019(\pm 0.003)i$ ,在相对湿度小于 55% 时约为  $1.37(\pm 0.02)-0.020(\pm 0.003)i$ ;粗模态气溶胶复折射率在相对湿度大于 55% 时约为  $1.4-0.004(\pm 0.002)i$ ,在相对湿度小于 55% 时约为  $1.48(\pm 0.02)-0.005(\pm 0.002)i$ 。不同模态的气溶胶粒子折射率差异明显,该结论对研究海洋气溶胶气候效应具有一定的参考价值,同时对建立茂名地区海域气溶胶模型具有重要意义。

**关键词** 大气光学与海洋光学; 海洋气溶胶; Mie 散射; 复折射率; 气溶胶谱分布; 粗模态; 细模态

中图分类号 O433.5

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222921

## Investigating Inversion Method for Marine Atmospheric Aerosol with Complex Refractive Index

Liu Menglei<sup>1,2</sup>, Li Xuebin<sup>2\*</sup>, Chen Jie<sup>2,3</sup>, Wang Feifei<sup>2,3</sup>, Luo Tao<sup>2</sup>, Cui Shengcheng<sup>2</sup>, Zhang Zihan<sup>2</sup>, Liu Qiang<sup>2</sup><sup>1</sup>Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China;<sup>2</sup>Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;<sup>3</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, Anhui, China

**Abstract** In order to study the optical properties of different modes of marine atmospheric aerosols, coarse and fine modal classification and complex refractive index inversions are carried out and studied based on the Mie scattering theory of spherical particles. This is done using tools such as a visibility meter, automatic weather station, optical particle counter (OPC), and cavity attenuated phase shift (CAPS) single scattering albedo monitor. The inversions are carried out for atmospheric aerosols in the coastal waters of Maoming, Guangdong. The results show that the refractive index of fine-modal aerosol at 530 nm is approximately  $1.35(\pm 0.01)-0.019(\pm 0.003)i$  when the relative humidity is greater than 55%, and it is  $1.37(\pm 0.02)-0.020(\pm 0.003)i$  when the relative humidity is less than 55%. The refractive index of coarse-modal aerosol is approximately  $1.40-0.002(\pm 0.002)i$  when the relative humidity is greater than 55%, and it is  $1.48(\pm 0.02)-0.005(\pm 0.002)i$  when the relative humidity is less than 55%. There is a clear difference in the refractive indexes of aerosol particles in different modals, which has a reference value for studies of the marine aerosol climate effect and the establishment of aerosol models in the Maoming sea area.

**Key words** atmospheric optics and ocean optics; marine aerosols; Mie scattering; complex refractive index; aerosol spectral distribution; coarse modals; fine modals

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2022-11-09; 录用日期: 2022-11-22; 网络首发日期: 2022-12-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41875041)、先进激光技术安徽省实验室青年基金(AHL2021QN01)

通信作者: \*xbli@aiofm.ac.cn

## 1 引言

大气气溶胶是指由大气与悬浮在其中的固体以及液体粒子共同组成的分散体系。大气气溶胶在大气中所占比例较小,一方面通过直接辐射效应改变地球大气辐射,另一方面通过间接辐射效应参与云的形成,对全球辐射平衡以及局地气候有着重要的影响<sup>[1]</sup>。海洋大气气溶胶通常由初级海洋气溶胶、二次海洋气溶胶组成<sup>[2]</sup>。海洋大气气溶胶参与海洋上多种大气过程,对海洋大气循环乃至全球气候都有着重要作用<sup>[3]</sup>。通常,气溶胶光学特性由大气气溶胶的粒子谱分布和复折射率决定。其中,气溶胶复折射率用于描述气溶胶消光特性(光吸收与光散射之和)。因此,作为影响地球气候变化的重要参数,准确得到气溶胶复折射率对于降低气溶胶引起的气候变化评估的不确定性具有重要意义。特别地,在评估气溶胶辐射效应时,气溶胶粒子复折射率的实部主要决定气溶胶的光散射,虚部主要影响气溶胶的光吸收。因此,精确计算气溶胶的复折射率对理解气溶胶的光学特性和气溶胶的气候效应具有重要意义。

气溶胶粒子复折射率的测量研究自 20 世纪初已经开始,在实验室中已经获取了多种气溶胶粒子样本的复折射率。但是在实际大气环境中,多数研究人员只能利用测量的近地面颗粒物的尺度谱以及气溶胶散射和吸收系数,通过反演的方法来得到近地面气溶胶的复折射率。目前,国内外研究人员对许多地区的气溶胶复折射率进行了反演计算。如 Raut 等<sup>[4]</sup>反演得到巴黎地区 532 nm 的平均气溶胶复折射率为 1.51-0.017i; Irshad 等<sup>[5]</sup>利用简单谐振子带模型<sup>[6]</sup>计算并测定了海盐气溶胶的折射率,该模型适用于相对湿度在 8 个不同值(0.4%~86%)下的气溶胶; Jurányi 等<sup>[7]</sup>利用光学粒子计数器和扫描迁移率粒度计在南极沿海站点测量计算了一年的气溶胶粒子复折射率,他们提出南极地区干燥气溶胶颗粒平均有效折射率为 1.44(±0.08); 陈静静等利用多波段天空辐射计对青岛 2003 年 9 月至 2007 年 4 月期间晴天条件下的气溶胶复折射率进行了反演。反演结果表明,气溶胶粒子的复折射率虚部具有明显的日变化和季节变化特征:秋季(0.015) > 春季(0.011) > 冬季(0.008); 耿蒙等<sup>[8-9]</sup>基于 Mie 散射理论对新疆、天津、厦门及合肥四个地区的气溶胶折射率进行反演,得到四个地区的折射率实部均约为 1.5,折射率虚部分别为 0.01(新疆)、0.017(天津)、0.008(厦门)、0.016(合肥); Zhang 等<sup>[10]</sup>利用太阳天空辐射计的遥感观测,分别反演出北京地区粗、细两个模态的复折射率。尽管上述的研究方法可以得到整个大气气溶胶粒子群的复折射率,但目前还很少有人将气溶胶粒子群进行分模态(粗模态和细模态)来反演,得到多种模态的复折射率。气溶胶粒子模态不同,其成分会有较大差异,复折射率也会有显著

不同。因此,将气溶胶粒子群分为粗和细两个模态,分别反演出不同模态的气溶胶粒子复折射率,有助于了解气溶胶的复折射特性,而且对于验证大气化学模式也是至关重要的。

## 2 仪器和实验

本文综合运用 CAPS-ALB 腔衰减相移式单散射反照率监测仪(CAPS)、自动气象站、能见度仪和多道光粒子计数器(OPC)<sup>[11-12]</sup>等设备对广东茂名地区近海海域的气溶胶进行测量,得到实际大气中海洋近地面气溶胶粒子数浓度谱分布以及散射和消光系数。

CAPS 是一种能够单独直接测量气溶胶粒子消光和散射系数的仪器,该仪器的时间分辨率为 1 s。它提供了三种不同波长的可见光选择,包含 450 nm 的蓝光、530 nm 的绿光和 630 nm 的红光,适用于不同来源气溶胶消光和散射系数的测量。本实验所采用的仪器为 CAPS-ALB,测量波长为 530 nm, CAPS 的测量范围为 0~5000 Mm<sup>-1</sup>。该仪器具有操作简单、可长时间连续测量、自动校准等优点。OPC 利用气溶胶粒子的光散射特性实时对粒子的数浓度进行测量。它将气溶胶粒子按照半径分为 17 档,被采样空气通过散射腔的流量为 300 ml/min 时,粒子的数浓度范围可达 500000/L。由于 OPC 采样过程不改变粒子的悬浮状态,所以它的测量结果更加直观地反映出气溶胶粒子的谱特征。其他主要测量设备包括自动气象站、能见度仪等。所有测量装置均安装于离地面高约 5 m 的楼顶。

## 3 折射率反演方法

### 3.1 气溶胶粒子谱分布

目前比较常用的一种粒子数浓度谱分布是对数正态分布,其函数表达式<sup>[13]</sup>为

$$n(r) = dN/d \lg r = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma_{gm}} \exp\left(-\frac{(\lg r - \lg r_{gm})^2}{2 \lg^2 \sigma_{gm}}\right), \quad (1)$$

式中:  $N_0$  为单位体积空气中粒子总数;  $r_{gm}$  和  $\sigma_{gm}$  分别为峰值半径和几何标准偏差。在实际大气中,气溶胶粒子模态多变,粒径谱分布通常由多种谱叠加而成。当选择的参数合适时,粒子谱的对数正态分布就可以近似描述整个气溶胶尺度谱分布。理论上只要选择合适的  $r_{gm}$  和  $\sigma_{gm}$ ,任何气溶胶的数浓度谱分布几乎都可以用对数正态分布和它们的叠加来描述。

通常,三种模态的叠加可以较完整地描述气溶胶粒子谱分布。按照粒径大小将气溶胶粒子分为以下三种模态:模半径  $r_1 \leq 0.8 \mu\text{m}$  的细粒模(fine modal)、模半径  $r_1$  在 2~3  $\mu\text{m}$  的粗粒模(coarse modal)、模半径  $r_1$  在 1  $\mu\text{m}$  左右的中间模(middle modal)。细粒模在粒子计数器测量范围内近似用荣格(Junge)谱分布表示,中间模和粗粒模可用对数正态分布来拟合。如图 1 所示,

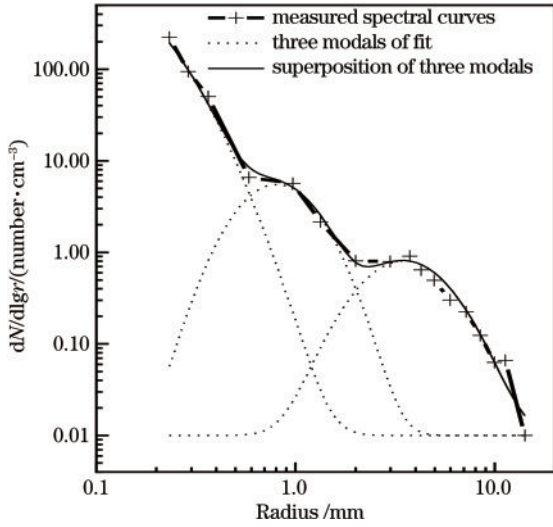


图 1 三种模态拟合结果

Fig. 1 Fitting results of three modals

是一个实际大气气溶胶的谱分布。图中使用荣格分布、对数正态分布对其三种模态分别进行拟合。

本文采用 log-normal 谱分布来拟合实测结果,并计算其不同模态对应的消光、散射及吸收系数。

### 3.2 复折射率计算方法

Mie 散射理论是由德国物理学家 Gustav Mie 通过求解麦克斯韦方程组得到的均匀介质球对弹性散射的严格解。可以计算任意大小、任意材料的球形颗粒的散射。本文根据 Mie 散射理论,利用气溶胶的数浓度谱分布和折射率分别计算出气溶胶的吸收、散射系数及消光系数<sup>[13]</sup>,其计算公式如下:

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

$$K_{\text{sca}} = \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} Q_{\text{sca}}(\alpha, m) n(r) \pi r^2 dr, \quad (3)$$

$$K_{\text{abs}} = K_{\text{ext}} - K_{\text{sca}}, \quad (4)$$

式中:  $\alpha = 2\pi r/\lambda$  是粒子的尺度参数;  $r$  为粒子的半径;  $\lambda$  为入射光的波长;  $m$  为粒子的复折射率;  $n(r)$  为粒子的数浓度谱分布;  $K_{\text{ext}}$ 、 $K_{\text{sca}}$  和  $K_{\text{abs}}$  分别表示相应的消光、散射和吸收系数。由气溶胶的数浓度谱分布、散射系数和吸收系数分别反演得到气溶胶粗、细两个模态的复折射率。

当气溶胶粒子复折射率实部和虚部分别取不同值时,对应的谱分布也不相同,如图 2 所示,不同复折射率对应的粒子谱分布也不相同。

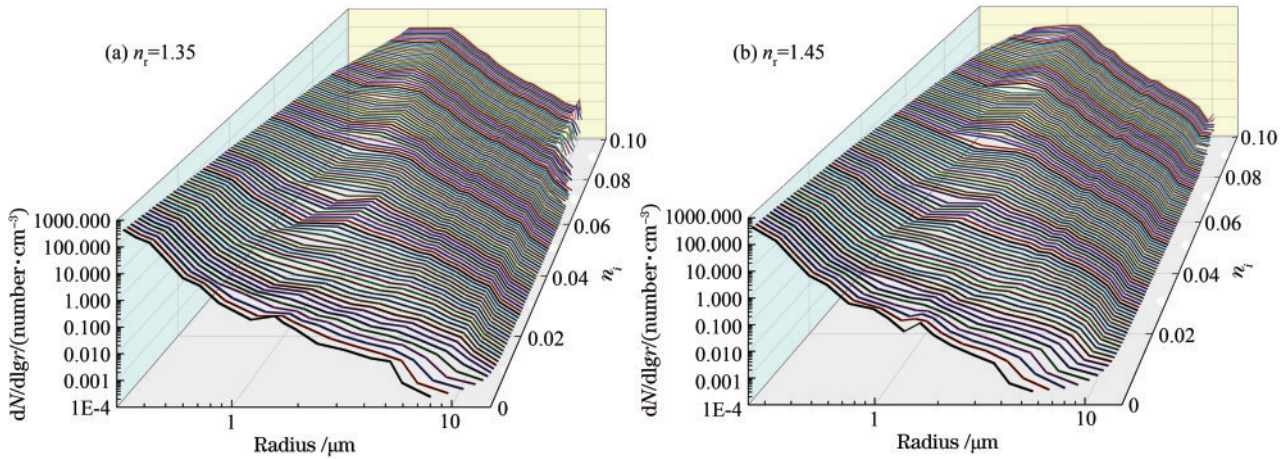


图 2 茂名近海海边气溶胶粒子的粒子谱分布。(a)复折射率实部为 1.35; (b)复折射率实部为 1.45

Fig. 2 Particle spectrum distribution of aerosol particles near sea in Maoming. (a) Complex refractive index real part is 1.35; (b) complex refractive index real part is 1.45

通过粒径分布结合 Mie 散射理论反演气溶胶折射率是获取气溶胶复折射率的常用方法。然而,大多数研究者都是将气溶胶粒子群看作一个整体来计算整体的复折射率,很少按照不同的模态来分别计算出粗、细模态的气溶胶粒子群的复折射率。因此,为了得到更准确的气溶胶复折射率,首先根据气溶胶粒子谱的对数正态分布,将粒子半径小于 1 μm 的粒子作为细模态,大于 1 μm 的列为粗模态。再依据 Mie 散射理论分别计算出粗模态和细模态对应的消光、散射系数。最后,将计算结果与 CAPS 的测量值进行对比。在各仪器的测量误差范围内对海洋大气气溶胶的平均复折射率进行反演。粗细模态复折射率计算流程图如图 3 所

示。复折射指数反演的具体步骤如下:

- 1) 给定气溶胶复折射率和粒子半径的初猜值范围,并分别设置实部和虚部步长;
- 2) 根据已知的波长信息和气溶胶粒子的不同复折射率以及对应的半径,分别计算出其对应的散射和消光效率因子;
- 3) 根据分模态的气溶胶谱分布,通过 Mie 散射理论分别计算出气溶胶粒子的散射和消光系数;
- 4) 遍历所有的初猜值,得到其对应的散射和消光系数,与 CAPS 的测量值做对比,当误差小于一个定值时(该定值为 CAPS 的仪器测量误差),记录下当前的复折射率值。不断迭代上述步骤,直至其收敛,即认为

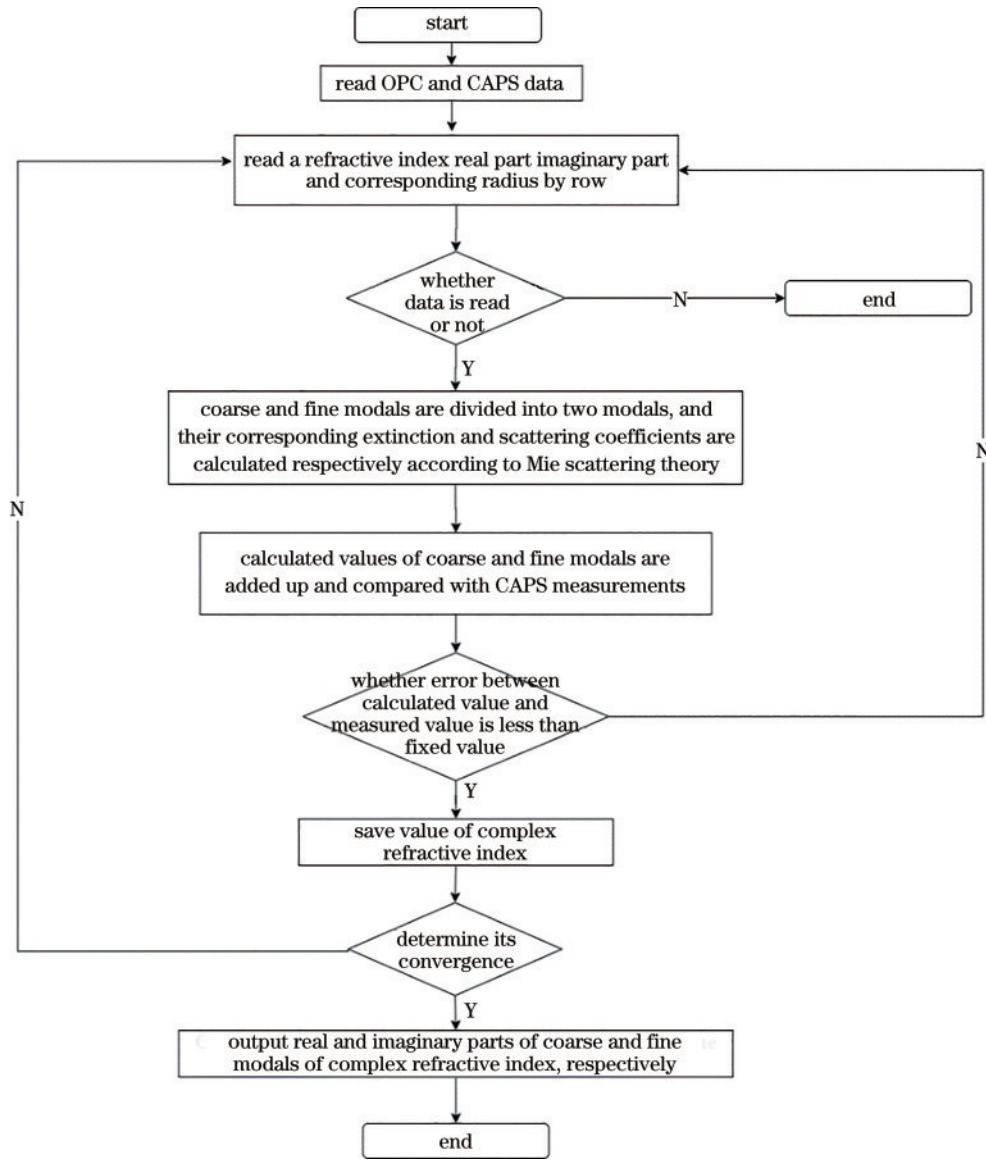


图3 粗细模态复折射率计算流程图

Fig. 3 Flow chart of coarse and fine modal complex refractive index calculation

该假设值为气溶胶的复折射率。

## 4 实验结果与验证

### 4.1 反演结果

采用近似计算的方法,将气溶胶粒子群看作是球形粒子群,并将其分为粗、细两个模态。利用 Mie 散射理论分别计算其对应的散射和消光系数,将计算值与 CAPS 的测量值进行对比,选择计算值与测量值最接近时的折射率作为反演结果。反演结果显示,细模态

的平均复折射率大约在  $1.35-0.018i$ ,粗模态大约在  $1.45-0.004i$ 。为了更准确地得到气溶胶复折射率的变化,对昼夜不同时间段的气溶胶复折射率进行进一步分类计算。表 1 所示为一天当中三个时间段的气溶胶粗、细两个模态的复折射率反演结果。反演结果显示,在夜间,细模态复折射率实部数值维持在  $1.34\sim 1.36$  之间,虚部数值在  $0.016\sim 0.022$  之间,粗模态复折射率实部始终保持在  $1.40$  附近,虚部为  $0.002\sim 0.005$ 。白天由于相对湿度较低,细模态复折射率实部

表 1 不同时间段不同模态气溶胶粒子的复折射率实部和虚部取值范围

Table 1 Range of values of real and imaginary parts of complex refractive indices of aerosol particles in different modals at different time periods

Time period	Coarse-modal real part	Coarse-modal imaginary part	Fine-modal real part	Fine-modal imaginary part
0:00-8:00	1.4	0.002-0.005	1.34-1.36	0.016-0.022
8:00-16:00	1.45-1.50	0.003-0.007	1.35-1.40	0.018-0.023
16:00-24:00	1.4	0.002-0.005	1.34-1.36	0.016-0.022

约为 1.35~1.40,虚部约为 0.018~0.023,粗模态复折射率约为 1.45~1.50,虚部约为 0.003~0.007。

反演所采用的数据集为广东茂名地区 2018 年 10 月份 OPC 测量的粒子谱分布以及 CAPS 测量的消光及吸收系数。如图 4 所示为测量期间的温度和相对湿度月平均值,相对湿度夜间明显高于白天。图 5 所示为每小时平均粒子数浓度值,粗模态气溶胶粒子数浓度较低,粗粒子受环境影响较小;而细模态气溶胶粒子数浓度较高,且与相对湿度成正比。这可能是由于海洋气溶胶粒子吸湿特性较为明显,在一定相对湿度条件下会有吸湿增长现象。

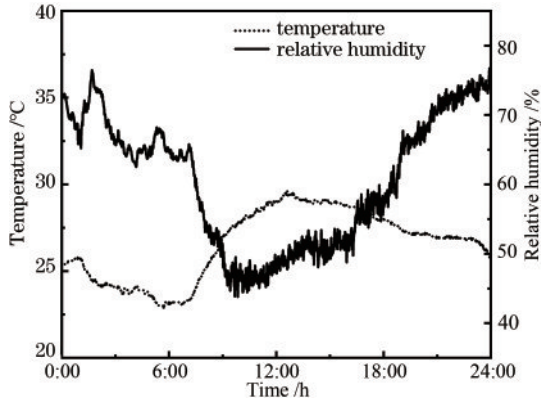


图 4 茂名海边温度和相对湿度日变化

Fig. 4 Daily variation of temperature and relative humidity at Maoming seashore

每个时间段的复折射率反演结果显示:海洋气溶胶粒子的复折射率虚部昼夜变化不明显,而实部白天明显高于夜间,并且气溶胶粒子复折射率实部粗模态略高于细模态,虚部细模态明显高于粗模态。推测原因是海洋受人类活动影响较小,所以海洋气溶胶细模态多为水汽,粗模态多为海盐颗粒。当相对湿度较大时,细模态气溶胶粒子数增加,气溶胶含水(复折射率实部为 1.33)增加,因此夜晚湿度大时细模态复折射率实部小于白天细模态复折射率实部。由于海洋气溶胶几乎不受人类活动影响,粗模态气溶胶一般由海洋表层

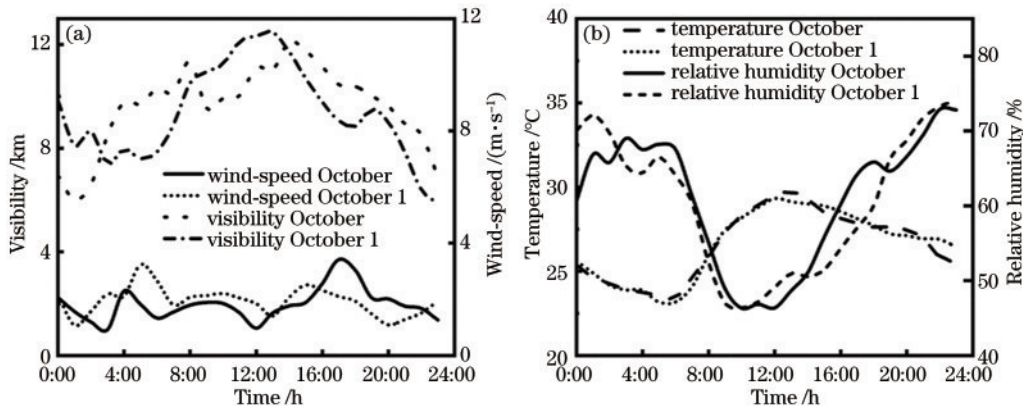


图 6 茂名近海的气象参数。(a)风速和能见度;(b)温度和相对湿度

Fig. 6 Meteorological parameters of Maoming offshore. (a) Wind-speed and visibility; (b) temperature and relative humidity

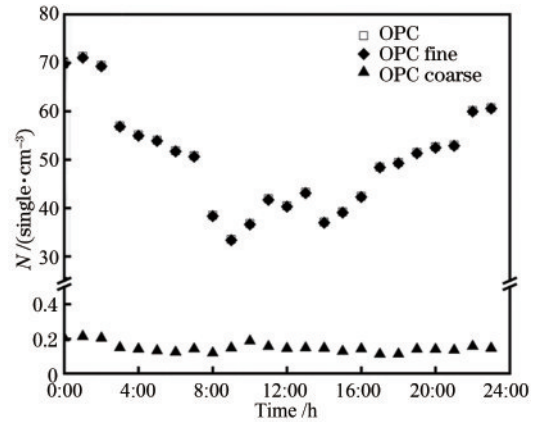


图 5 茂名近海大气气溶胶粗细模态粒子数和粒子总数

Fig. 5 Number and total number of particles in coarse and fine modal of atmospheric aerosol near Maoming offshore

海水泡沫破裂产生,湿度较大,所以粗模态气溶胶复折射率实部略小于海盐粒子(复折射率实部约为 1.5)。虚部主要与吸收有关,气溶胶粗模态粒子数明显少于细模态,所以复折射率虚部粗模态明显小于细模态。

#### 4.2 验证

利用 2018 年 10 月份的数据反演得到气溶胶粗、细两个模态的复折射率,选择 10 月 1 号的数据作为验证使用。用反演得到的两模态的复折射率平均值以及 OPC 测量的数浓度谱计算出消光和散射系数,与 CAPS 的测量值做对比。

当天气状况(气象参数)以及能见度相近时(图 6),计算值与测量值的对比结果如图 7 所示。用反演得到的折射率平均值(1.35-0.018i 和 1.45-0.004i)计算出气溶胶光学特性参数,计算值与测量值变化趋势整体一致,且吻合较好。根据对比结果可知,夜间消光和散射系数的计算值与实测值符合较好;白天误差相对较大,可能是由于白天温度升高,相对湿度降低,大气中的水分子含量降低,从而导致复折射率增大,但其整体变化趋势以及整体误差依然很小;此外,气溶胶粗、细模态的复折射率的反演结果显示,细模态

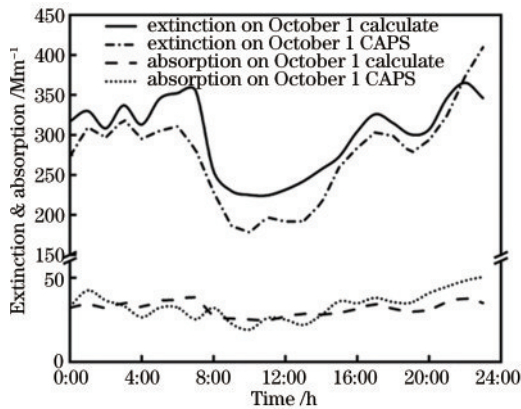


图 7 茂名近海气溶胶消光和吸收实测值与计算值的对比  
Fig. 7 Comparison of measured and calculated aerosol extinction and absorption values in Maoming offshore

复折射率实部略低于粗模态,而虚部明显高于粗模态。该结果与 2002 年 Hand 等<sup>[14]</sup>获得的结论一致。以上分析结果表明,本文建立的反演算法应用于实际测量数据可以很好地获取气溶胶的光学特性(消光和吸收),表明该反演方法是合理可行的。

## 5 结 论

本文主要根据 OPC 和 CAPS 测量的气溶胶粒子数浓度谱分布和光学特性参数(消光系数和散射系数),利用 Mie 散射理论分别反演出气溶胶粒子粗、细两个模态的复折射率。通过对广东茂名地区 10 月份海洋大气气溶胶进行测量,反演出 530 nm 时细模态气溶胶粒子的复折射率在相对湿度大于 55% 时复折射率约为  $1.35(\pm 0.01) - 0.019\pm(0.003)i$ ,在相对湿度小于 55% 时约为  $1.37(\pm 0.02) - 0.02(\pm 0.003)i$ ;粗模态气溶胶粒子的复折射率在相对湿度大于 55% 时约为  $1.4 - 0.004(\pm 0.002)i$ ,在相对湿度小于 55% 时约为  $1.48(\pm 0.02) - 0.005(\pm 0.002)i$ 。该结论对研究海洋气溶胶气候效应具有一定的参考价值,同时对建立茂名海域气溶胶模型具有参考意义。

## 参 考 文 献

[1] Andreae M O, Rosenfeld D. Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols[J]. *Earth-Science Reviews*, 2008, 89(1/2): 13-41.  
[2] O'Dowd C D, Smith M H, Consterdine I E, et al. Marine aerosol, sea-salt, and the marine sulphur cycle: a short review[J]. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(1): 73-80.  
[3] Langmann B, Scannell C, O'Dowd C. New Directions:

organic matter contribution to marine aerosols and cloud condensation nuclei[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(33): 7821-7822.

- [4] Raut J C, Chazette P. Vertical profiles of urban aerosol complex refractive index in the frame of ESQUIF airborne measurements[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(4): 901-919.  
[5] Irshad R, Grainger R G, Peters D M, et al. Laboratory measurements of the optical properties of sea salt aerosol [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(1): 221-230.  
[6] Grainger R G, Lucas J, Thomas G E, et al. Calculation of Mie derivatives[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(28): 5386-5393.  
[7] Jurányi Z, Weller R. One year of aerosol refractive index measurement from a coastal Antarctic site[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(22): 14417-14430.  
[8] 李学彬, 黄印博, 徐赤东, 等. 厦门地区气溶胶折射率的测量[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 1831-1835.  
Li X B, Huang Y B, Xu C D, et al. Measurement of refractive index for aerosol particle in Xiamen[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(10): 1831-1835.  
[9] 耿蒙, 李学彬, 秦武斌, 等. 典型地区大气气溶胶谱分布和复折射率特征研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(3): 182-188.  
Geng M, Li X B, Qin W B, et al. Research on the characteristics of aerosol size distribution and complex refractive index in typical areas of China[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 182-188.  
[10] Zhang Y, Li Z Q, Zhang Y H, et al. Estimation of aerosol complex refractive indices for both fine and coarse modes simultaneously based on AERONET remote sensing products[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(9): 3203-3213.  
[11] 李学彬, 高亦桥, 魏合理, 等. 双散射角光学粒子计数器的研制[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7): 1528-1534.  
Li X B, Gao Y Q, Wei H L, et al. Development of optical particle counter with double scattering angles[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(7): 1528-1534.  
[12] 谭锟, 胡欢陵. 光学粒子计数器测量结果的订正[J]. *光学学报*, 1984, 4(1): 55-60.  
Tan K, Hu H L. Correction of measured results of an optical particle counter[J]. *Acta Optica Sinica*, 1984, 4(1): 55-60.  
[13] 周秀骥. 高等大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1991.  
Zhou X J. *Advanced atmospheric physics*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991.  
[14] Hand J L, Kreidenweis S M. A new method for retrieving particle refractive index and effective density from aerosol size distribution data[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2002, 36(10): 1012-1026.