

# 永兴岛海洋气溶胶粒子谱反演研究\*

黄岸峰, 邓孺孺, 秦雁, 陈启东, 梁业恒  
(中山大学地理科学与规划学院, 广东广州510275)

**摘要:** 地基遥感方法可以直接得到大气气溶胶的辐射特性, 用于气溶胶粒子谱分布特征的研究。利用 ASD 地物光谱仪在永兴岛海洋站楼顶获取的太阳辐射实测数据, 应用蒙特卡罗方法随机生成气溶胶 4 种组分比例近似求解消光方程来反演气溶胶粒子谱。结果表明, 实验期间永兴岛气溶胶各组分比例与标准辐射大气模型中的海洋型气溶胶相似; 体积谱为双峰分布, 2 个主峰分别位于  $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$  和  $1 \sim 10 \mu\text{m}$ ; 数浓度谱为单峰分布, 主峰位于  $0.001 \sim 0.01 \mu\text{m}$ ; 数浓度和体积浓度变化规律与海水扰动、粒子的干湿沉降过程有关, 与浊度指数相关性达 98% 以上, 可用来表征大气浑浊程度。

**关键词:** 海洋气溶胶; 蒙特卡罗方法; 粒子谱; 永兴岛

**中图分类号:** P407.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)03-0138-07

## A Study on Remote-Sensing Inversion of Aerosol Particle Size Distributions over Yongxing Island

HUANG Anfeng, DENG Ruru, QIN Yan, CHEN Qidong, LIANG Yeheng  
(School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Ground-based remote sensing can directly get the radiation characteristics of atmospheric aerosol, which can be used in the study of aerosol particle size distribution. Atmospheric monitoring experiment was carried out on the roof of Marine Station by using ASD spectrometer and the solar radiation was measured. Based on obtained data, this paper applies Monte Carlo to randomly generate the proportions of four aerosol components which are used to approximately solve the extinction equation to retrieve aerosol particle size distribution. The result shows that during the period of experiment the aerosol type of Yongxing Island is similar to the marine aerosol defined by the standard radiative atmosphere; the volume size distribution is bimodal distribution with the peaks at  $0.01 \sim 0.1$  and  $1 \sim 10 \mu\text{m}$  respectively; the number concentration distribution is unimodal distribution with the peak at  $0.001 \sim 0.01 \mu\text{m}$ ; the change rule of aerosol number concentration and volume concentration is relevant to both the movement of sea water and the deposition of aerosol particle; the correlation coefficients for number concentration and turbidity index, volume concentration and turbidity index are above 98%, which means that number and volume concentrations can be used to represent the atmospheric turbidity.

**Key words:** maritime aerosol; Monte Carlo method; particle size distribution; Yongxing Island

大气气溶胶是地球-大气系统的重要组成部分, 它会对通过大气的太阳辐射产生辐射强迫作

用, 进而影响涉及大气的众多研究领域, 如环境、气候、军事和遥感等<sup>[1-5]</sup>。气溶胶粒子尺度分布是

\* 收稿日期: 2014-08-08

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2012BAH32B03); 海洋公益性行业科研专项基金资助项目(201205040); 广东省水资源节约和保护基金资助项目(FLXGL2014-D41)

作者简介: 黄岸峰(1990年生), 男; 研究方向: 环境遥感; 通讯作者: 邓孺孺; E-mail: eesdr@mail.sysu.edu.cn

气溶胶的一个重要特征量，不同尺度对气候、自然环境及人们的生活的影响有很大差异，如  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  等，这种尺度分布常被称为粒子谱。粒子谱是气溶胶消光特性的决定性因素，也是气溶胶在大气中输运特性和寿命的决定因素之一<sup>[6]</sup>。为了全面描述气溶胶的辐射特性或气候效应，利用遥感方法对其粒子谱分布进行定量的描述非常必要。

气溶胶具有不同的尺度分布模态，Whitby<sup>[7]</sup> 研究发现大气气溶胶尺度谱有 3 个分离的模态：核模态 ( $r < 0.1 \mu\text{m}$ )，积聚模态 ( $0.1 < r < 1.0 \mu\text{m}$ ) 和粗模态 ( $r > 1.0 \mu\text{m}$ )。地基遥感是目前对气溶胶监测研究的重要手段之一，其主要是通过测量太阳辐射的变化来反演气溶胶粒子特性。King 等<sup>[8]</sup> 发现消光法可以较好地反演半径在  $0.1 \sim 5.0 \mu\text{m}$  之间的气溶胶谱分布。吕达仁等<sup>[9]</sup> 提出了同时测量直接消光和小角散射确定气溶胶光学厚度和谱分布的方法，邱金桓等<sup>[10]</sup> 也进行了试验研究，提出该方法可以较好地提供  $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$  粒径范围的气溶胶谱分布信息，目前该方法已经在地基气溶胶遥感中得到了广泛应用。

近几年来气溶胶区域气候效应已经引起了较大关注，新一轮气溶胶光学特性研究工作正在开展<sup>[11-12]</sup>。西沙群岛是中国南海四大群岛之一，以永兴岛为中心。吴兑等<sup>[13]</sup> 较早对南海及永兴岛海域海盐粒子 ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Na}^+$  等) 的日平均变化规律及其与风速、波高和潮位之间的关系进行了研究。本文则采用地基遥感方法，利用实测太阳直射辐射数据，反演永兴岛上空的整层大气气溶胶粒子谱分布特征，并讨论了粒子浓度与浑浊度系数之间的关系。

## 1 研究区

西沙群岛位于我国南海西北部，以永兴岛为中心，共有 22 个岛屿，7 个沙洲，和 10 多个暗礁暗滩组成，是中国南海四大群岛之一。主体部分位于  $15^\circ 40' - 17^\circ 10' \text{N}$ ， $111^\circ - 113^\circ \text{E}$  范围。其西面是永乐群岛，东面是宣德群岛。

本次大气观测实验点位于海南省三沙市政府驻地永兴岛。永兴岛是宣德环礁的一个灰沙珊瑚岛礁，是西沙群岛的主岛，也是南海诸岛中面积最大的岛屿。岛东西长约  $1\ 950 \text{ m}$ ，南北宽约  $1\ 350 \text{ m}$ ，面积  $2.10 \text{ km}^2$ 。岛上地势平坦，平均高出海面约  $5 \text{ m}$  左右，为珊瑚磷灰质黑色土覆盖。地处热带中部，属热带海洋季风气候。年平均气温  $26 \sim 28 \text{ }^\circ\text{C}$ ，年降水量  $1\ 800 \text{ mm}$  以上，6-10 月为雨季，多台

风活动。每年 5-9 月盛行西南季风，11 月至次年 3 月盛行东北季风。岛上无工业分布，且常住人口较少，故所测气溶胶污染较少，比较符合以海洋气溶胶为主的背景气溶胶状况。

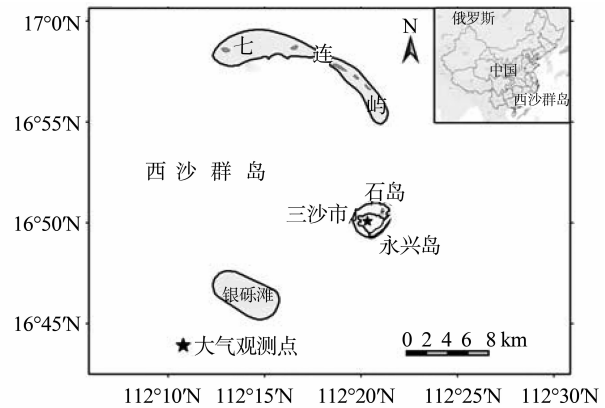


图1 永兴岛地理位置图

Fig. 1 Geographical locations of Yongxing Island

## 2 数据与方法

### 2.1 光学厚度测量

2014 年 5 月 12-14 日，在永兴岛国家海洋站 ( $16^\circ 50' \text{N}$ ,  $112^\circ 20' \text{E}$ )，采用 ASD FieldSpec3 地物光谱仪展开了 3 d 不同时段的大气观测实验，共获得 1 400 条曲线。根据永兴岛海洋站天气监测情况及实验记录，实验期间天气晴朗，少云，偏南风，风力小于 3 级。

ASD FieldSpec3 地物光谱仪，可探测波长范围为  $350 \sim 2\ 500 \text{ nm}$ ，采样时间为  $17 \text{ ms/次}$ ，波长精度达  $\pm 1 \text{ nm}$ 。其光谱分辨率在  $350 \sim 1\ 050 \text{ nm}$  区间为  $3.5 \text{ nm}$ ，在  $1\ 050 \sim 2\ 500 \text{ nm}$  区间为  $10 \text{ nm}$ 。光谱采样间隔在  $350 \sim 1\ 050 \text{ nm}$  区间为  $1.4 \text{ nm}$ ，在  $1\ 050 \sim 2\ 500 \text{ nm}$  区间为  $2 \text{ nm}$ 。采用该仪器进行测量，可实时获得被测物体的反射率、辐亮度或辐照度，得到连续光谱曲线，这可以为进一步反演气溶胶粒子化学成分提供更多波段选择。亓雪勇<sup>[14]</sup> 等利用地物光谱仪进行气溶胶光学厚度的测量，并将实验结果与 6S 大气辐射传输模型的结果进行对比，最大偏差为 6%。本文采用类似的方法在海拔  $21 \text{ m}$  的海洋站楼顶进行了太阳直射辐射测量。测量使用  $25^\circ$  传感器探头，可获得较好天空光数据。为尽可能消除人为误差，实验人员遵循严格着装要求（深色调，黑色为主），并选择太阳未被云遮蔽时进行测量。分 2 个步骤进行：首先是对标准板测量太阳辐射总辐照度，然后迅速用遮阴挡板挡住太阳

直射辐射测量天空漫射辐照度,前者与后者之差即为太阳直射光辐照度  $E_\lambda$ 。

根据比尔定律,大气光学厚度与太阳直射光辐照度的关系为:

$$E_\lambda = cE_{0\lambda} \exp(-m\tau_\lambda) \quad (1)$$

其中,  $E_{0\lambda}$  是在日地平均距离上大气外界的太阳光谱辐照度,  $E_\lambda$  为到达地面的太阳光直射光辐照度,  $m$  为大气质量数。  $c$  为测量时刻的日地距离常数,可以通过查资料获取。通过方程 (1) 可以求得总的大气光学厚度  $\tau_\lambda$ 。

大气的吸收作用在某些波段可以忽略,其对太阳辐射的削弱作用主要是大气分子的散射,气溶胶粒子及臭氧的消光作用。因此,从总光学厚度中扣除瑞利光学厚度  $\tau_R$ , 臭氧光学厚度  $\tau_{O_3}$  就得到气溶胶光学厚度  $\tau_a$ 。根据 Ångström 公式  $\tau_a = \beta\lambda^{-\alpha}$ , 可利用多个大气窗口波段求解波长指数  $\alpha$  和浑浊度系数  $\beta$ 。  $\alpha$  与粒子尺度大小有关,  $\beta$  表征大气浑浊程度。

## 2.2 气溶胶粒子谱反演原理

消光法是遥感气溶胶粒子谱最早应用,也是最成熟的一种方法,其根据太阳直射辐射的衰减来反演气溶胶粒子谱。 King 等<sup>[8]</sup> 提出,通过测量透过大气层的太阳直射辐射,可以所获得大气气溶胶光学厚度值,进而研究气溶胶光学特性和反演其粒子谱分布。假设大气微粒可以等效为折射率已知的均匀球状粒子,则气溶胶光学厚度  $\tau_a(\lambda)$  与其数浓度谱分布的关系式为:

$$\tau_a(\lambda) = \int_{r_0}^{\infty} \int_0^M \pi r^2 Q(\lambda, r, m) n(r, z) dz dr \quad (2)$$

式中,  $r$  是气溶胶粒子的半径,  $\lambda$  为波长,  $m$  为气溶胶粒子的复折射率;  $n(r, z) dz$  表示高度  $z$  处,半径在  $r$  到  $r + dr$  之间的气溶胶粒子数密度;  $Q$  为消光效率因子,是  $\lambda$ 、 $r$  和  $m$  的函数。则气溶胶的光学厚度在整层大气高度积分可得:

$$\tau_a(\lambda) = \int_{r_0}^M K(\lambda, r, m) n(r) dr \quad (3)$$

$$K(\lambda, r, m) = \sigma_e(\lambda, r, m) = \pi r^2 Q(\lambda, r, m) \quad (4)$$

$$n(r) = \int_0^{\infty} n(r, z) dz \quad (5)$$

$K(\lambda, r, m)$  定义为权重函数。将一系列波长的  $\tau_a(\lambda)$  代入方程 (3) 进行求解,即可得到气溶胶的数浓度谱分布  $n(r)$ 。对于气溶胶的体积谱分布  $v(r)$ , 方程 (3) 可改写为:

$$\tau_a(\lambda) = \int_{r_0}^M K(\lambda, r, m) v(r) dr \quad (6)$$

$$K(\lambda, r, m) = \sigma_e(\lambda, r, m) / \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right) = \frac{3}{4r} Q(\lambda, r, m) \quad (7)$$

常用的解法是把  $n(r)$  分成快变函数  $h(r)$  和慢变函数  $f(r)$ , 即  $n(r) = f(r)h(r)$  则将 (3) 式转化为第一类 Fredholm 方程的求解。 Phillips<sup>[15]</sup> 和 Towney<sup>[16]</sup> 对该方法进行了改进,增加光滑因子和光滑矩阵。但不合理的初始快变函数和光滑约束<sup>[17]</sup> 会导致求解失败。

标准辐射大气模型 (SRA) 定义了大陆型、海洋型和城市型 3 种气溶胶模型,而每一种模型均由水溶性、沙尘、海洋性和煤烟四种组分按一定比率组合而成<sup>[18]</sup>。本文运用蒙特卡罗方法来反演永兴岛气溶胶粒子谱分布,过程如下:首先确定气溶胶各组分的消光效率因子  $Q$ , 然后选择合适的谱分布函数,随机生成 4 种组分的比例,以消光法计算气溶胶光学厚度  $\tau_e(\lambda)$ , 将其与仪器观测到的光学厚度  $\tau_m(\lambda)$  进行对比,若二者相对误差满足要求时,则记录 4 种气溶胶组分的比例。根据蒙特卡罗方法的思想,重复以上过程,当计算次数达到一定量时,各组分比例的统计均值则代表比较正确的气溶胶类型。

**2.2.1 消光效率  $Q$  的确定** 消光效率因子  $Q$  是反演气溶胶数浓度谱分布和体积谱分布过程中的一个重要参数,其取值影响反演结果的精度。当  $\lambda$  和  $r$  一定时,  $Q$  由复折射率  $m$  决定。因此,  $m$  的取值将直接影响反演结果。假设大气粒子为均匀球状粒子,按不同气溶胶组分、不同波长给  $m$  的实部和虚部取值<sup>[18]</sup>,由米散射理论可以得到其消光效率因子  $Q$ 。如图 2 所示,不同组分气溶胶的消光效率因子  $Q$  呈现有规律的一系列极大值和极小值的干涉结构,随半径  $r$  衰减震荡,并逐渐收敛于 2。

**2.2.2 谱分布函数的选择** 国内外研究人员对大气气溶胶进行了大量的观测实验和数值模拟,提出了各种差异较大的经验谱分布函数,如 Junge 谱、指数谱和复正态对数谱等。Junge 谱是大量观测资料总结出来的,适用于半径区间为 0.1 ~ 2  $\mu\text{m}$  的大气气溶胶;指数谱分布则需要实测数据拟合多个参数。理论和实验研究表明<sup>[19-20]</sup>,复正态对数谱适用于一切随机过程,且能较好地描述多种模态的气溶胶,本文采取复正态对数谱。

对于数浓度谱有:

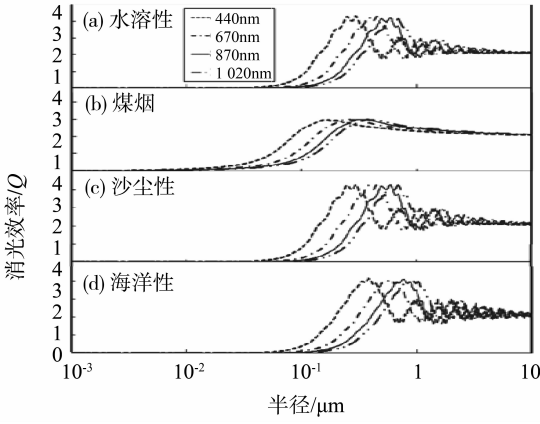


图 2 4 种气溶胶组分的消光效率

Fig. 2 Extinction efficiency of four aerosol components

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = \sum_i \frac{N_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_i r} \exp\left\{-\frac{[\ln(r) - \ln(\bar{r}_i)]^2}{2(\sigma_i)^2}\right\} \quad (8)$$

$N_i$  为第  $i$  种类型气溶胶的单位截面积大气柱中的粒子数目,  $\bar{r}_i$  为均值半径,  $\sigma_i$  为  $r$  的标准差。

对于体积谱分布有:

$$v(r) = \frac{dV}{dr} = \sum_i \frac{V_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_i r} \exp\left\{-\frac{[\ln(r) - \ln(\bar{r}_i)]^2}{2(\sigma_i)^2}\right\} \quad (9)$$

式中,  $\bar{r}_i$  为体积中值半径,  $V_i$  为第  $i$  种类型气溶胶单位截面粒子的柱体积。方程 (8) 和 (9) 中的参数取值可参考文献<sup>[18]</sup>。

权重函数  $K$  是粒子半径  $r$  和消光效率因子  $Q$  的函数, 反映气溶胶光学厚度对粒子尺度的敏感性。从图 (2) 可知, 半径小于  $0.1 \mu\text{m}$  时,  $Q$  较小,  $r^2$  小于  $0.01$ , 根据公式 (4) 得到数浓度的  $K$  值很小, 甚至小于  $10^{-10}$ 。半径在  $1 \sim 10 \mu\text{m}$  区间,  $Q$  和  $r^2$  均比较大, 数浓度的  $K$  值可以达到  $10^3$ 。选择数浓度谱分布进行反演时,  $K$  的取值跨度很大, 会影响反演结果的精度。而体积谱的权重函数  $K(\lambda, r, m) = \frac{3}{4}Q(\lambda, r, m) * \frac{1}{r}$ ,  $r$  越小,  $\frac{1}{r}$  越大, 能有效调节消光效率  $Q$  的分布。

图 3 系气溶胶 4 种组分的  $K$ , 在  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$  出现峰值。同组分气溶胶、不同波长的  $K$  值差别较大, 能有效反映粒子对不同波长的消光作用。因此, 为提高精度, 选择体积谱分布  $v(r)$  为谱分布函数反演粒径区间  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$  的气溶胶粒子谱。

2.2.3 气溶胶粒子谱反演 不同气溶胶组分的  $K$  不同, 由方程 (3) 和 (9) 得到:

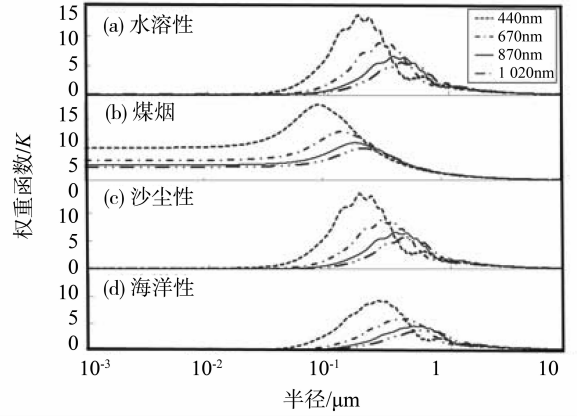


图 3 4 种气溶胶组分的体积谱的权重函数  $K$

Fig. 3 Volume size distribution  $K$  of four aerosol components

$$\tau_a(\lambda) = \int_{r_0}^m \sum_{i=1}^4 K_i(\lambda, r, m) \frac{dV_i}{dr} dr \quad (10)$$

式中  $i = 1, 2, 3, 4$  分别表示水溶性、沙尘性、海洋性和煤烟 4 种气溶胶组分。

对 (10) 式进行离散化处理, 取复化梯形公式:

$$\tau_a(\lambda) = \sum_{i=1}^4 \left( \frac{h}{2} K_i(\lambda, r_1, m) \frac{dV_i}{dr} + h \sum_{j=2}^{n-1} K_i(\lambda, r_j, m) \frac{dV_i}{dr} + \frac{h}{2} K_i(\lambda, r_n, m) \frac{dV_i}{dr} \right) \quad (11)$$

式中,  $h = 0.01, n = 1000, a = 0.01, r_j = a + (j - 1) * h, j = 1, 2, 3, 4n$ 。

假设仪器观测的光学厚度为  $\tau_m(\lambda)$ , 随机生成气溶胶三种组分的比例: 水溶性  $\eta_1$ , 沙尘  $\eta_2$ , 煤烟  $\eta_3$ , 且  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  均大于 0 且小于 1, 则煤烟比例为  $\eta_4 = 1 - \eta_1 - \eta_2 - \eta_3$ 。气溶胶单位柱粒子总体积为  $V$ , 则各种类型气溶胶粒子的体积为:  $V_1 = V * \eta_1, V_2 = V * \eta_2, V_3 = V * \eta_3, V_4 = V * \eta_4$ 。结合 (9) 式得到:

$$\frac{dV}{dr} = V \sum_{i=1}^4 \frac{\eta_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_i r} \exp\left\{-\frac{[r - \ln(\bar{r}_i)]^2}{2(\sigma_i)^2}\right\} \quad (12)$$

令  $f_i(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i r} \exp\left\{-\frac{[r - \ln(\bar{r}_i)]^2}{2(\sigma_i)^2}\right\}$ , 则:

$$\tau_a(\lambda) = V \sum_{i=1}^4 \eta_i \left( \frac{h}{2} K_i(\lambda, r_1, m) f_i(r_1) + h \sum_{j=2}^{n-1} K_i(\lambda, r_j, m) f_i(r_j) + \frac{h}{2} K_i(\lambda, r_n, m) f_i(r_n) \right) \quad (13)$$

定义单位体积气溶胶的光学厚度  $\tau_v(\lambda)$  为:

$$\tau_v(\lambda) = \sum_{i=1}^4 \eta_i \left( \frac{h}{2} K_i(\lambda, r_1, m) f_i(r_1) + h \sum_{j=2}^{n-1} K_i(\lambda, r_j, m) f_i(r_j) + \frac{h}{2} K_i(\lambda, r_n, m) f_i(r_n) \right) \quad (14)$$

则气溶胶粒子总体积为:

$$V_\lambda = \tau_a(\lambda) / \tau_v(\lambda) \quad (15)$$

$\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$ 、 $\eta_4$  和  $\tau_a(\lambda)$  为已知值, 代入式 (14) 和 (15) 可以计算得到各波段的体积  $V_\lambda$ , 则体积浓度的均值  $\bar{V}$  为:

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum V_\lambda \quad (16)$$

用均值  $\bar{V}$  代替粒子总体积  $V$ , 得到各组分气溶胶的体积  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ 。根据 (13) 式计算各波段气溶胶光学厚度  $\tau_c(\lambda)$ 。

当满足条件:

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum \left( \frac{\tau_m(\lambda) - \tau_c(\lambda)}{\tau_m(\lambda)} \right)^2} < \varepsilon \quad (17)$$

记录  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$ 、 $\eta_4$ 。重复以上过程, 当次数达到一定量时,  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$ 、 $\eta_4$  的统计结果就代表比较正确的气溶胶类型。 $\varepsilon$  的取值与仪器观测精度有关, 当观测数据质量较差时, 必须放大  $\varepsilon$  以取得一定量的结果。

### 3 结果与分析

#### 3.1 粒子谱反演结果

图 4 和图 5 是 3 d 的平均气溶胶光学厚度和 Ångström 指数平均值:

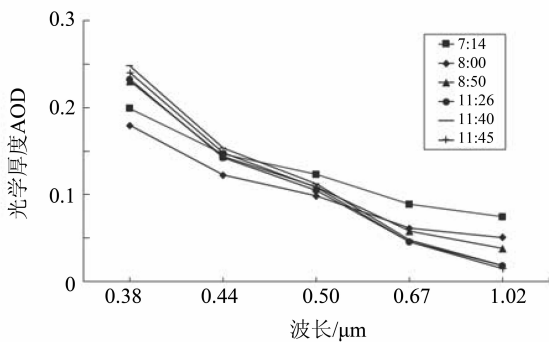


图 4 气溶胶光学厚度平均值

Fig. 4 Average value of aerosol optical thickness

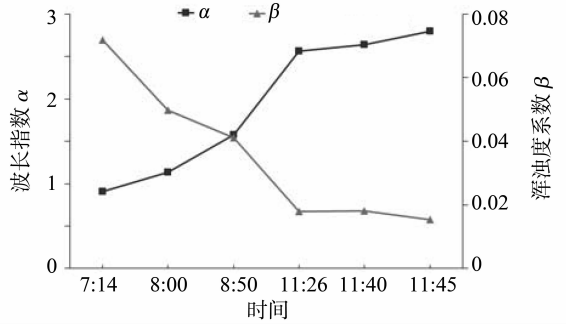


图 5 Ångström 指数平均值

Fig. 5 Average value of Ångström index

果。表 1 系各组分气溶胶粒子比例的统计均值, 图 6 系反演得到的体积谱分布 (a) 和数浓度谱分布 (b)。

表 1 4 种组分气溶胶体积浓度所占比例及其标准差

Table 1 The volume concentration proportion of four aerosol components and the standard deviation

时间	水溶性 沙尘性 海洋性 煤烟				标准差
	%				
7: 14	2.76	2.48	94.53	0.24	0.15
8: 00	2.75	2.45	94.57	0.23	0.17
8: 50	2.75	2.45	94.58	0.23	0.17
11: 26	2.76	2.43	94.58	0.22	0.28
11: 40	2.75	2.43	94.59	0.23	0.29
11: 45	3.14	2.12	94.52	0.22	0.31

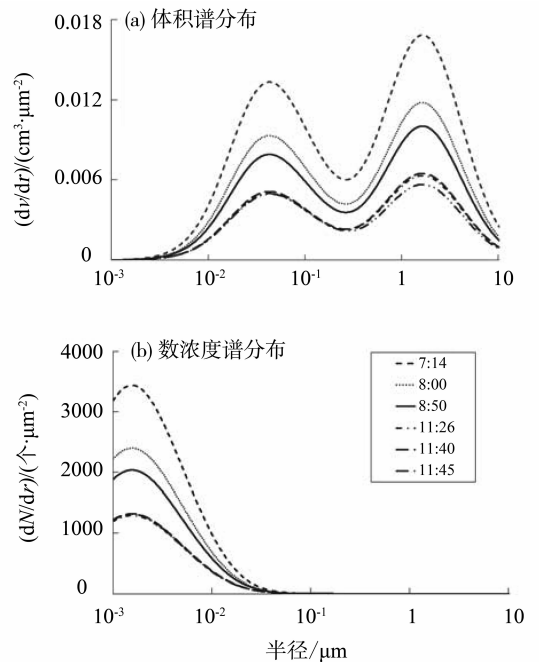


图 6 谱分布反演结果

Fig. 6 Inversion results of Size distribution

基于 Microsoft Visual Studio 2010 开发平台, 使用 C# 语言编程计算了 10 万次, 得到粒子谱反演结

通过 440, 670, 870 和 1 020 nm 4 个波段气溶胶光学厚度, 反演得到实验期间永兴岛 4 种组分气溶胶体积浓度所占比例如表 1 所示, 其中海洋性组分气溶胶比例随时间变化不大, 约为 95%, 其次是水溶性和沙尘性组分气溶胶。这与标准辐射大气海洋型气溶胶组分比例 (海洋性 95%, 水溶性 5%) 分布近似, 表明永兴岛大气气溶胶海洋性显著。永兴岛常驻人口较少, 岛上并无工业分布, 交通运输业不发达, 人类生产、生活活动对大气影响不大。其海洋性组分主要由海水泡沫破碎蒸发引起, 而沙尘性组分则主要由岛上裸露土壤和风化岩石贡献。反演过程中, 当光学厚度较小时, 为产生一定量的结果, 需要对  $\epsilon$  取值放大, 导致反演误差较大 (如 11: 45 时, 标准差达到 0.31)。

永兴岛大气气溶胶体积谱反演结果如图 6 (a) 所示: 同一天不同时刻大气柱气溶胶体积谱呈现双峰分布, 第一峰值落在  $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$  的核模态粒径范围, 第二峰值落在  $1 \sim 10 \mu\text{m}$  的粗模态粒径范围。可见气溶胶体积浓度主要是这两个粒径区间的粒子所贡献。由图 4 和图 5 可知, 从早上 7: 14 到中午 11: 45 时, 对粒子消光作用明显的短波段处气溶胶光学厚度值不断减小, 说明粒子含量减少; 这与体积谱反演结果一致, 气溶胶体积浓度随时间呈现不断减小的趋势。气溶胶波长指数随时间增大, 表明主控粒子粒径减小, 这解释了体积谱双峰峰值差距逐渐缩小的原因。

图 6 (b) 为气溶胶数浓度谱随时间变化情况, 数浓度谱曲线在  $0.001 \sim 0.01 \mu\text{m}$  粒径区间呈单峰分布, 表明西沙气溶胶数浓度主要由这部分粒子贡献。从早上 7: 14 时到中午 11: 45 时, 其峰值也不断减小, 从约  $3\ 500$  个/ $\mu\text{m}^2$  降到约  $1\ 500$  个/ $\mu\text{m}^2$ 。早上数浓度谱分布变化较大, 中午则趋向稳定。

进一步分析, 永兴岛粒子谱反演结果与其所处的海洋背景的有关: 当海水发生扰动, 风浪破碎、海浪拍岸会产生大量泡沫、气泡, 气泡破裂时随之产生大量的海水飞沫, 大部分海水滴因重力作用而不断降落, 还有相当一部分漂浮在空气中, 随大气湍流向上输送。温度上升, 这部分飞沫的水分蒸发后形成以氯化钠为主的气溶胶海盐粒子; 由于海洋初生的盐核一般由水分和海盐粒子组成, 粒径较大, 但随着水分的蒸发、浓缩, 传播到上空的海盐粒子粒径则变小。因此, 永兴岛大气气溶胶粒子谱分布变化特征与海盐粒子的沉降、蒸发、转化等过程有关。

### 3.2 气溶胶浓度与浑浊度系数

单位截面大气柱所有粒径粒子的体积和数目, 也就是气溶胶体积浓度和数浓度。实验观测期间的体积浓度及数浓度随时间变化如图 7 所示。

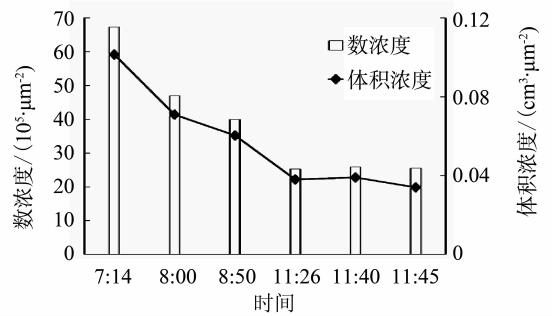


图 7 数浓度和体积浓度随时间变化  
Fig. 7 Changes of number concentration and volume concentration with time

据长期的潮汐观测记录, 永兴岛潮汐属于典型的半日潮, 一天中有两次高潮和低潮。日出和日落为涨潮时段, 中间时段为落潮时段。涨潮时, 海水扰动剧烈, 容易产生许多水汽和海盐粒子, 这将导致气溶胶数浓度和体积浓度增大。虽然缺乏一天之内连续的实测数据, 但可以预见永兴岛数浓度及体积浓度一天之内的变化曲线为“碗”状特征。

数浓度与体积浓度随时间变化特征一致, 将二者与浑浊度系数作散点图得到图 8 所示结果。

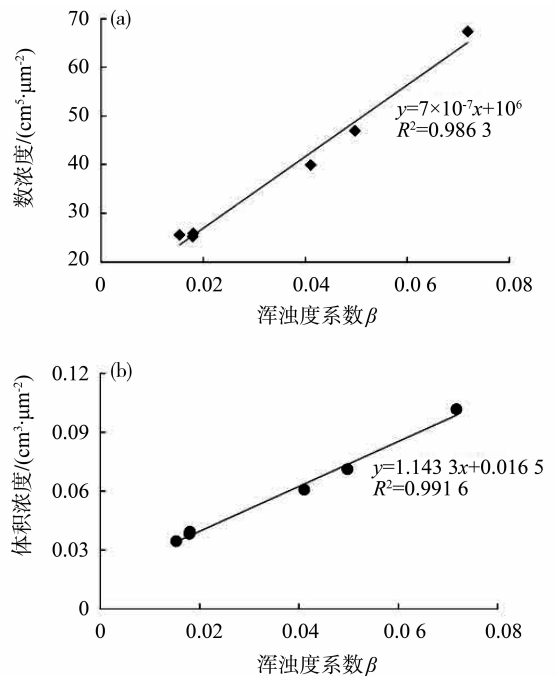


图 8 气溶胶浓度与浑浊度散点图  
Fig. 8 Scatter plot between aerosol concentration and turbidity index

浑浊度系数  $\beta$  与气溶胶粒子总数、折射率指数和谱分布等密切相关。 $\beta < 0.1$  表示大气非常清洁,  $\beta > 0.2$  表示大气明显浑浊,  $\beta > 0.4$  则表示严重浑浊。由图 3 可知, 浑浊度系数最大不超过 0.1, 反映实验期间永兴岛大气非常干净。图 8 中 (a) 为气溶胶数浓度与浑浊度系数的散点图, 相关系数为 98.63%; (b) 为体积浓度与浑浊度系数的散点图, 相关系数为 99.16%; 均高度线性相关。侧面反映体积谱反演结果精度较高, 同时表明数浓度和体积浓度可以用来表征大气浑浊程度。当数浓度和体积浓度较大时, 大气较浑浊; 数浓度和体积浓度较小时, 大气比较干净。

## 4 结 论

本文利用永兴岛大气观测数据, 运用蒙特卡罗方法随机模拟求解消光方程来反演气溶胶粒子谱, 获得了如下结论:

1) 永兴岛气溶胶具有显著的海洋性特征, 其气溶胶各组分比例与标准辐射大气的海洋型气溶胶近似一致。

2) 实验观测期间, 永兴岛气溶胶体积谱为双峰分布, 数浓度谱为单峰分布。粒子谱分布变化特征与海水扰动及气溶胶粒子的浓缩、沉降、蒸发和转化的过程有关。

3) 体积浓度和数浓度的日变化规律与海水潮汐运动有一定关系。

4) 数浓度和体积浓度与浑浊度系数高度线性相关, 二者也可以用来表征大气浑浊程度。

## 参考文献:

- [1] 尹宏, 大气辐射学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- [2] LOHMANN U, FEICHTER J. Global indirect aerosol effects: A review [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5 (3): 715 - 737.
- [3] PÖSCHL U. Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2005, 44(46): 7520 - 7540.
- [4] AUGER F, GENDRON M C, CHAMOT C, et al. Responses of well-differentiated nasal epithelial cells exposed to particles: role of the epithelium in airway inflammation [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2006, 215(3): 285 - 294.
- [5] 陈良富, 李莘莘, 陶金花, 等. 气溶胶遥感定量反演研究与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [6] PALTRIDGE G W, PLATT C M R. Radiative processes in meteorology and climatology[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976: 142 - 159.
- [7] WHITBY K T. The physical characteristics of sulfur aerosols [J]. *Atmospheric Environment*, 1978, 12(1): 135 - 159.
- [8] KING M D, BYRNE D M, HERMAN B M, et al. Aerosol size distributions obtained by inversions of spectral optical depth measurements [J]. *Journal of the atmospheric sciences*, 1978, 35(11): 2153 - 2167.
- [9] 吕达仁, 周秀骥, 邱金桓. 消光 - 小角散射综合遥感气溶胶分布的原理与数值试验[J]. *中国科学*, 1981(12): 1516 - 1523.
- [10] 邱金桓, 汪宏七, 周秀骥, 等. 消光 - 小角散射法遥感气溶胶谱分布的实验研究[J]. *大气科学*, 1983, 7(1): 33 - 41.
- [11] SMIRNOV A, HOLBEN B N, GILES D M, et al. Maritime aerosol network as a component of AERONET-first results and comparison with global aerosol models and satellite retrievals[J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussion*, 2011(4): 583 - 597.
- [12] 范学花, 陈洪滨, 夏祥鳌. 中国大气气溶胶辐射特性参数的观测与研究进展[J]. *大气科学*, 2013, 37(2): 477 - 498.
- [13] 吴兑, 毛伟康, 甘春玲, 等. 西沙永兴岛西南季风期大气中  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  核的分布特征[J]. *热带气象学报*, 1990, 4: 357 - 364.
- [14] 亓雪勇, 田庆久, 利用地物光谱仪测算大气气溶胶光学厚度方法[J]. *遥感信息*, 2004(4): 16 - 18.
- [15] PHILLIPS D L. A technique for the numerical solution of certain integral equations of the first kind [J]. *Journal of the ACM*, 1962, 9(1): 84 - 97.
- [16] TWOMEY S. Comparison of constrained linear inversion and an iterative nonlinear algorithm applied to the indirect estimation of particle size distributions [J]. *Journal of Computational Physics*, 1975, 18(2): 188 - 200.
- [17] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 89 - 93
- [18] DEEPAK A, GERBER HE. Report of the Experts Meeting on Aerosols and their Climatic Effects [R]. World Meteorological Organization, 1983.
- [19] TANRE D, REMER L A, KAUFMAN Y J, et al. Retrieval of aerosol optical thickness and size distribution over ocean from the MODIS airborne simulator during TARFOX[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D2): 2261 - 2278.
- [20] DUBOVIK O, KING M D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D16): 20673 - 20696.