

## 海洋大气气溶胶粒子谱分布及其消光特征分析

鲁先洋<sup>1,2</sup>, 李学彬<sup>1</sup>, 秦武斌<sup>1,2</sup>, 朱文越<sup>1</sup>, 徐青山<sup>1</sup>

- (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. 中国科学技术大学研究生院 科学岛分院, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 为研究海洋大气气溶胶粒子数浓度时空分布和粒径谱分布特征, 2014 年 8 月至 2016 年 3 月期间, 利用光学粒子计数器和自动气象站等设备在广州茂名海边、东海和南海海域、三亚近海海域以及太平洋和印度洋海域对海洋大气气溶胶粒子数密度谱及大气温度、湿度、气压、风速等进行了测量。对不同海域不同气象条件下的谱分布特征进行了统计分析, 并对谱分布进行了拟合。结果表明海洋大气气溶胶粒子谱分布是由一个细粒模和一个中间模组成, 但近海的粒子数浓度大于远海。远海气溶胶粒子谱型稳定, 海面风力是引起粒子数浓度变化的主要原因。东海和南海的粒子谱分为二段, 小于 0.5  $\mu\text{m}$  时用 Junge 谱的指数分布来描述, 0.5~4  $\mu\text{m}$  段用对数正态分布来描述。大风天气下海洋气溶胶的消光系数明显增加, 且在 1~3  $\mu\text{m}$  波段的消光特征基本不受波长的影响。

**关键词:** 海洋大气光学; 大气气溶胶; 粒子谱分布; 消光系数; 粒子数浓度

**中图分类号:** X831 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1211002

## Particle size distribution and extinction characteristic analysis of marine atmospheric aerosol

Lu Xianyang<sup>1,2</sup>, Li Xuebin<sup>1</sup>, Qin Wubin<sup>1,2</sup>, Zhu Wenyue<sup>1</sup>, Xu Qingshan<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

**Abstract:** For the study of spatial and temporal distribution of marine atmospheric aerosol number density and particle size distribution characteristics, the atmospheric aerosol particles size distribution, atmospheric temperature, humidity, pressure, wind speed etc were surveyed, from August 2014 to March 2016, by using an optical particle counter and automatic meteorological station in Maoming seaside, the East China Sea and the South China Sea, Sanya coastal waters and the Pacific and the Indian Ocean waters respectively. The aerosol spectral distribution in different areas under different meteorological conditions were statistically analyzed and fitted. The results show that the marine atmospheric aerosol particle size distribution is composed of a fine mode and a middle mode, but offshore sea particle number density is greater than that of open sea. The open sea particle size distribution keep steady, the sea surface wind is

收稿日期: 2017-04-05; 修订日期: 2017-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(41205010, 41305019); 国家“863”计划

作者简介: 鲁先洋(1979-), 男, 博士生, 主要从事大气探测方面的研究。Email: xianyang@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 徐青山(1965-), 男, 研究员, 博士, 主要从事大气探测、辐射传输、卫星遥感与图像大气订正等方面的研究。

Email: qshxu@aiofm.ac.cn

the main reason of the change of the aerosol number density. In the East China Sea and the South China Sea, the particle size distribution was divided into two sections, the exponential distribution of Junge spectrum was used to describe the section less than 0.5 micrometer, the logarithmic normal distribution was used to describe 0.5 to 4 micrometer section. The extinction coefficient of marine atmospheric aerosol increased obviously under the strong winds, and the extinction characteristics from 1 to 3 micrometer were not affected by wavelength.

**Key words:** atmospheric and oceanic optics; atmospheric aerosol; particle size distribution; extinction coefficient; particle number density

## 0 引言

海盐气溶胶是大气气溶胶的重要组分,其通过吸收和散射太阳辐射以及作为云凝结核参与云的形成,直接和间接地影响地气系统的辐射平衡和气候变化<sup>[1-3]</sup>。另外,海源气溶胶和陆源气溶胶的相互输送和相互作用,是沿海区域酸沉降的重要因素。因此,关于海洋大气中气溶胶颗粒物的成因、浓度、粒子谱分布、化学成分及其时空变化等研究日益受到国内外学者的重视。Kristina Plauškaitė等<sup>[4]</sup>研究了波罗的海区域海洋大气气溶胶粒子浓度、化学成分和不同天气条件对其的影响,指出暴风雨天气时,长时间恒定风向下产生的海浪破碎波对波罗的海的大气气溶胶粒子数浓度有重要影响;S.Ueda等<sup>[5]</sup>分析了太平洋热带和亚热带区域在不同气象条件下海洋大气气溶胶粒子谱分布特征和新粒子的形成规律;Gennady A.Kaloshin<sup>[6]</sup>研究了海洋和沿海区域大气气溶胶在可见光和红外光波段的消光特征;胡帅等<sup>[7]</sup>利用大气气溶胶粒子近红外体散射数据,反演气溶胶尺度谱,对城市型、乡村型和海洋型气溶胶都有很好的反演效果。黄岸峰<sup>[8]</sup>等利用实测的太阳直射辐射数据,反演永兴岛上空的整层大气气溶胶粒子谱分布,发现大气气溶胶粒子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,且与浑浊度指数有很好的相关性;纪嘉彬等<sup>[9]</sup>研究了西北太平洋及中国东部近海海洋大气气溶胶的成分和来源。

海洋大气气溶胶由海盐气溶胶和海洋背景大气气溶胶组成<sup>[10]</sup>。海水在风的作用下,通过波浪破碎进入海洋大气形成海盐气溶胶,粒径在 1  $\mu\text{m}$  附近,数浓度受风速影响较大<sup>[11]</sup>,其在大气中的滞留时间较短。海洋背景大气气溶胶一般通过气粒转化过程产

生,粒径主要集中于次微米,该部分粒子在空气中滞留时间较长。海洋大气气溶胶粒子的尺度谱和数浓度分布随时空变化很大。文中对海边、近海和远海的大气气溶胶谱分布、数密度以及气象参数和它们之间的相关性进行了分析研究,给出了统计结果。

## 1 仪器和实验

为了研究海洋大气气溶胶的谱分布及其特征,使用 OPC-06 多道光学粒子计数器<sup>[11-12]</sup>以及自动气象站等设备搭乘某测量船,于 2014 年 6 月在南海海域、2014 年 11 月至 2015 年 1 月在太平洋和印度洋海域、2015 年 9 月至 10 月在东海和南海海域、2015 年 11 月至 12 月在太平洋海域以及 2016 年 3 月在广州茂名海边,对上述海域的大气气溶胶谱分布和气象参数进行了测量。光学粒子计数器利用粒子的光散射特性来测量粒子的数密度谱,仪器将粒子粒径分成 17 档,使用直径为  $1.745 \pm 0.05 \mu\text{m}$ 、折射指数为  $m=1.59+i0.0$  的聚苯乙烯标准粒子进行标定。粒子谱数据每小时一组,自动气象站数据每秒钟一组,两个设备 24 h 连续测量。

## 2 不同区域气溶胶谱分布特征分析

### 2.1 陆地和海上气溶胶浓度和谱分布比较

图 1 给出了陆地上不同地域以及近海和远海的大气气溶胶粒子谱分布的实际测量值,显示海、陆气溶胶谱差别较大,陆地上不同地区气溶胶粒子浓度和谱分布变化较大。与陆地上气溶胶谱分布对比发现,近海气溶胶小粒子受到陆地粒子源的影响,但在 1  $\mu\text{m}$  附近的粒子主要来源于海洋飞沫-海盐。远海气溶胶粒子源主要是海洋飞沫和海洋背景气溶胶,飞沫气溶胶粒子半径主要在 0.8~2  $\mu\text{m}$  之间。

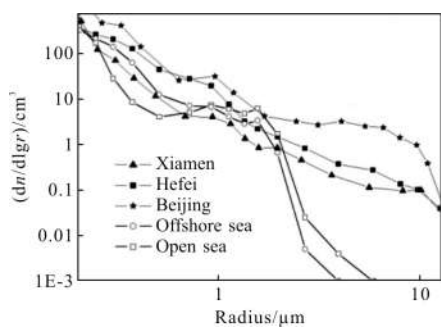


图 1 气溶胶粒子谱分布

Fig.1 Aerosol particle size distribution

使用对数正态分布对粒子谱分布进行拟合<sup>[13-15]</sup>, 表 1 给出不同区域实际测量的粒子谱分布在细粒模、中间模和粗粒模上的拟合参数,  $r_{gm}$  为几何平均半径,  $\sigma_{gm}$  为几何标准偏差,  $N_0$  为气溶胶粒子数浓度。

表 1 不同区域粒子谱对数正态拟合参数

Tab.1 Parameters of log-normal distribution fitting of particle size in different areas

Region	Fine mode			Middle mode			Coarse mode		
	$r_{gm}/\mu\text{m}$	$\sigma_{gm}$	$N_0$	$r_{gm}/\mu\text{m}$	$\sigma_{gm}$	$N_0$	$r_{gm}/\mu\text{m}$	$\sigma_{gm}$	$N_0$
Beijing	0.15	0.5	1 460	0.85	0.25	24	4	0.6	6
Hefei	0.2/0.5	0.5/0.45	360/42	-	-	-	2	0.8	1.2
Xiamen	0.1	0.6	700	0.8/1.7	0.36/0.4	4/0.7	-	-	-
Offshore sea	0.2	0.38	60	1.0	0.45	10	-	-	-
Open sea	0.15	0.35	50	1.1	0.35	6	-	-	-

## 2.2 东海、南海等近海粒子谱特征分析

2015 年 9 月至 10 月搭乘某测量船在东海和南海海域进行测量, 图 2 是东海和南海气溶胶粒子谱, 并用 Junge 谱分布和对数正态谱分布予以拟合。Junge 谱分布中拟合参数  $C$  和气溶胶粒子数浓度有关,  $V$  为谱分布指数。结果显示东海海域气溶胶粒子数浓度明显大于南海海域气溶胶粒子数浓度, 两个海域的粒子谱都是由一个细粒模和一个中间模叠加构成, 且中间模的几何平均半径都在  $1.0 \mu\text{m}$  附近, 几何标准偏差约为 0.45, 气溶胶来源主要是海洋飞沫。图 2 显示东海和南海的粒子谱由二段构成, 在小于  $0.5 \mu\text{m}$  时也可以用 Junge 谱的指数分布来描述, 在  $0.6 \sim 4 \mu\text{m}$  段用对数正态分布来描述。

五个测量区域的谱分布对数正态分布拟合的结果, 显示出不同区域粒子谱分布的特征: (1) 北京区域的粒子谱为细粒模、中间模以及粗粒模的叠加, 对应的几何平均半径为  $0.15$ 、 $0.85$ 、 $4 \mu\text{m}$ , 且三个模态粒子数浓度都高于其他区域; (2) 合肥区域的粒子谱为两个细粒模和一个粗粒模的叠加, 对应的几何平均半径是  $0.2$ 、 $0.5$ 、 $2 \mu\text{m}$ , 无明显的中间模态; (3) 厦门区域的粒子谱为一个细粒模和两个中间模的叠加, 对应的几何平均半径是  $0.1$ 、 $0.8$ 、 $1.7 \mu\text{m}$ , 粒子主要集中于细粒模; (4) 近海和远海海域的粒子谱为一个细粒模和一个中间模的叠加, 对应的几何平均半径范围是  $0.15 \sim 0.2 \mu\text{m}$  和  $1.0 \sim 1.1 \mu\text{m}$ , 近海的粒子数浓度大于远海, 近海和远海的粒子谱无明显的粗粒模态。

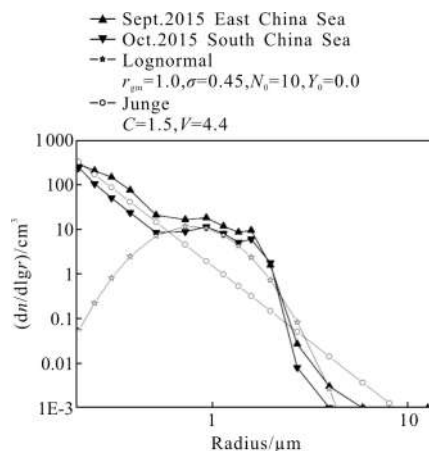


图 2 东海和南海气溶胶谱分布

Fig.2 Aerosol particle size distribution of the East China Sea and the South China Sea

2.3 海边、近海和远海的气溶胶谱分布变化

图 3 是 2016 年在广州茂名海边测量的谱分布, 图 4 和图 5 是 2015 年 11 月搭乘某测量船从上海一直到西太平洋气溶胶粒子谱分布的变化以及粒子浓度的变化, 图 6 是太平洋和印度洋上气溶胶粒子谱分布和对数正态分布拟合。由图 3~图 6 可以看出, 从海边、近海到远海的过程中, 气溶胶浓度在减小, 主要是小于 1 μm 和大于 2 μm 的气溶胶粒子浓度减小, 1~2 μm 段的粒子浓度变化不大。利用对数正态分布对其进行拟合, 显示远海气溶胶粒子谱为二个对数正态分布的叠加, 细粒模段的粒子源主要是海洋背景大气气溶胶, 对应的几何平均半径在 0.15 μm, 几何标准偏差为 0.35, 粒子数浓度约为 60 个/cm³; 中间模段的粒子源主要是海洋飞沫, 对应的几何平均半径为 1.1 μm, 几何标准偏差为 0.35, 粒子数浓度约为 6 个/cm³。

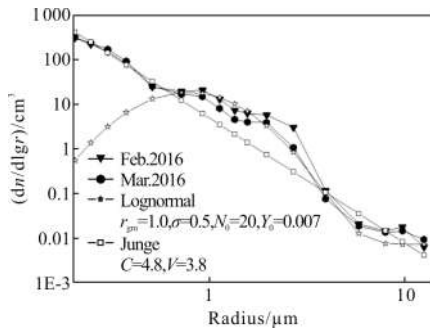


图 3 茂名海边气溶胶粒子谱对数正态分布拟合

Fig.3 Lognormal distribution fitting of aerosol particle size distribution in Maoming seaside

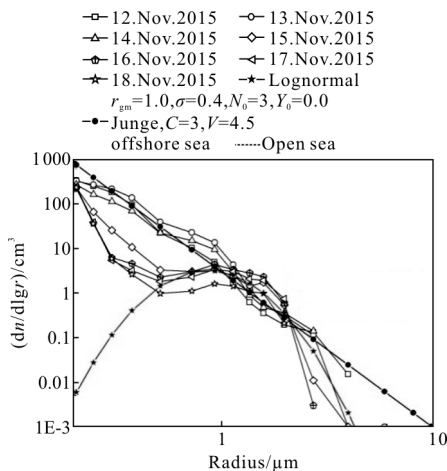


图 4 近海到远海气溶胶粒子谱对数正态分布拟合

Fig.4 Lognormal distribution fitting of aerosol particle size distribution from offshore sea to open sea

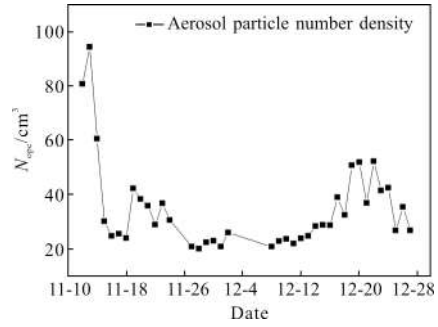


图 5 近海到远海气溶胶粒子浓度变化

Fig.5 Variations of aerosol particle number density from offshore sea to open sea

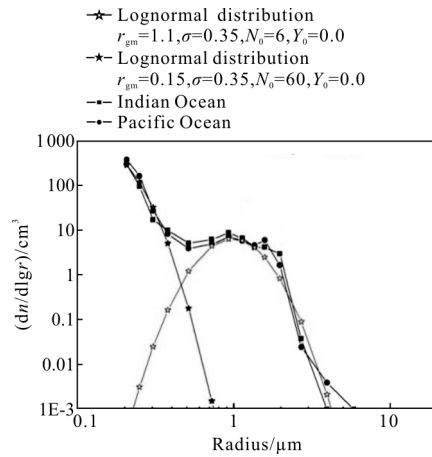
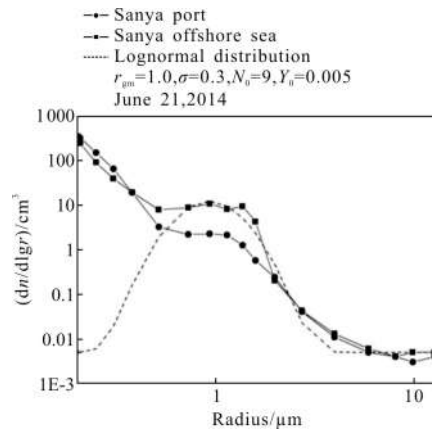


图 6 太平洋和印度洋气溶胶粒子谱拟合

Fig.6 Fitting of aerosol particle size distribution in the Indian Ocean and the Pacific Ocean

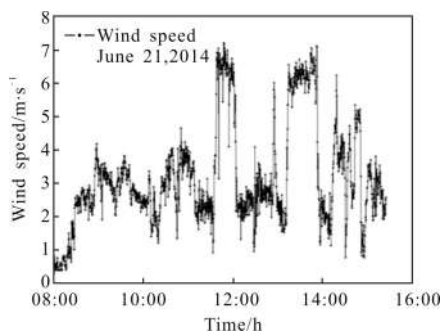
2.4 气溶胶粒子谱受海面风速的影响

图 7 是 2014 年 6 月 21 日在三亚某港口,海面上风速 3~4 m/s,能见度在港口为 50 km,距离海岸



(a) 气溶胶粒子谱分布

(a) Aerosol particle size distribution



(b) 近海海域风速

(b) Wind speed in offshore sea

图 7 气溶胶粒子浓度与风速之间的关系

Fig.7 Relation between aerosol particle number density and wind speed

30~50 海里(1 海里=1 852 m)的海域风速 5~6 m/s,能见度为 20~30 km,从粒子谱可以看出,由海港至近海,半径 1 μm 附近粒子数浓度增大,主要原因是大风吹起海洋飞沫引起的气溶胶粒子浓度增加,从而使能见度下降。海洋飞沫气溶胶粒子主要集中在 1 μm 附近,符合对数正态分布。图 8 是太平洋上气溶胶粒子谱受海面风速的影响,在太平洋上,气溶胶粒子源比较稳定,粒子谱型也很稳定,粒子成分主要是海盐,其气溶胶浓度的变化主要是由海表面风力变化引起的。

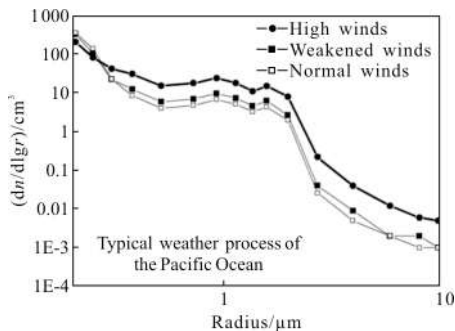


图 8 气溶胶粒子浓度受风速的影响

Fig.8 Influence of wind speed on aerosol particle number density

### 3 海面大气气溶胶消光特性分析

根据 Mie 散射理论,气溶胶粒子的消光系数、粒子谱分布和消光效率因子之间的计算关系为:

$$a_e = \pi \int Q_{ext}(m, r, \lambda) n(r) r^2 dr \quad (1)$$

式中:  $Q_{ext}$  为消光效率因子,是折射率  $m$ 、粒子半径  $r$  和波长  $\lambda$  的函数;  $n(r)$  为粒子谱分布。由海洋大气模式给出不同波长上的折射率  $m$ , 利用光学粒子计数

器测量粒子谱分布,根据公式(1)计算出海边、近海及远海气溶胶在不同波长上的消光系数。

图 9 是不同海域气溶胶消光系数随波长变化的关系,显示:(1) 在不同波长上海边的消光系数最大,远海的消光系数都是最小,这说明从海边到近海以及远海气溶胶浓度在减小;(2) 由于海洋气溶胶受风速影响较大,因此在大风天气海面上的气溶胶消光系数比正常情况下会明显增大;(3) 海上大风扬起的海洋飞沫主要是大粒子,因此在大风气象条件下,气溶胶在 1~3 μm 波段的消光特征基本不受波长的影响,可见海洋飞沫对红外光传输的影响是非常大的。

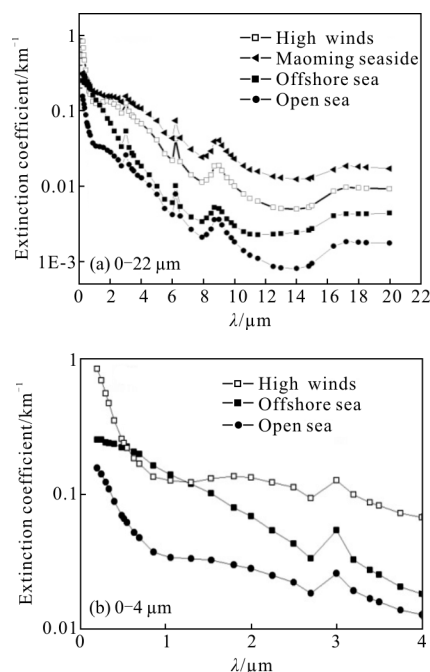


图 9 海洋气溶胶粒子消光系数随波长的变化关系

Fig.9 Relation between extinction coefficient of marine aerosol particle and wavelength

### 4 结论

(1) 近海海域粒子谱为一个细粒模和一个中间模的叠加,对应的几何平均半径为 0.2 μm 和 1.0 μm,近海的粒子数浓度大于远海,近海气溶胶粒子谱无明显的粗粒模态。

(2) 东海和南海海域气溶胶粒子来源主要是海盐飞沫气溶胶,其中间模的几何平均半径都在 1.0 μm 附近。东海和南海的粒子谱由二段构成,在小于 0.5 μm 时也可以用 Junge 谱的指数分布来描述,在 0.6~4 μm 段用对数正态分布来描述。

(3) 远海气溶胶粒子源比较稳定, 粒子谱型也很稳定, 气溶胶粒子谱为一个细粒模和一个中间模的叠加, 对应的几何平均半径为 0.15  $\mu\text{m}$  和 1.1  $\mu\text{m}$ , 粒子成分主要是海盐飞沫, 海面风力是引起粒子数浓度变化的主要原因。

(4) 大风天气下海洋大气气溶胶消光系数明显增大, 且在 1~3  $\mu\text{m}$  波段的消光特征基本不受波长的影响。

### 参考文献:

- [1] Xu Hui, Guo Jianping, Xavier Ceamanos, et al. On the influence of the diurnal variations of aerosol content to estimate direct aerosol radiative forcing using MODIS data [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 141: 186–196.
- [2] Sumita Kedia, Ribu Cherian, Sahidul Islam, et al. Regional simulation of aerosol radiative effects and their influence on rainfall over India using WRFChem model [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 182: 232–242.
- [3] Xu Mengchun, Xu Qingshan. Effect of aerosol particle characteristic and vertical distribution on radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0211002. (in Chinese)  
徐梦春, 徐青山. 气溶胶粒子特性和垂直分布对辐射的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 0211002.
- [4] Kristina Plauškaitė, Narciza Špirkauskaitė, Steigvilė Byčėnienė, et al. Characterization of aerosol particles over the southern and South-Eastern Baltic Sea [J]. *Marine Chemistry*, 2017, 190: 13–27.
- [5] Ueda S, Miura K, Kawata R, et al. Number-size distribution of aerosol particles and new particle formation events in tropical and subtropical Pacific Oceans [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 142: 324–339.
- [6] Gennady A Kaloshin. Visible and infrared extinction of atmospheric aerosol in the marine and coastal environment [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(14): 2124–2133.
- [7] Hu Shuai, Gao Taichang, Li Hao, et al. Regularized inversion method for retrieving aerosol size distribution based on volume scattering function data at near-infrared waveband [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 17–26. (in Chinese)  
胡帅, 高太长, 李浩, 等. 基于近红外体散射数据的气溶胶尺度谱正则化反演方法 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(1): 17–26.
- [8] Huang Anfeng, Deng Ruru, Qin Yan, et al. A study on remote-sensing inversion of aerosol particle size distributions over Yongxing island [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2015, 54(3): 138–144. (in Chinese)  
黄岸峰, 邓孺孺, 秦雁, 等. 永兴岛海洋气溶胶粒谱反演研究 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2015, 54(3): 138–144.
- [9] Ji Jiabin, Chen Liqi, Wang Jianjun, et al. Characters of the aerosol over the northwest Pacific and eastern China coastal area in autumn [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2016, 35(3): 339–347. (in Chinese)  
纪嘉彬, 陈立奇, 汪建君, 等. 西北太平洋及中国东部近秋季海洋气溶胶分布特征 [J]. *应用海洋学学报*, 2016, 35(3): 339–347.
- [10] Kong Yawen, Sheng Lifang, Liu Qian, et al. Impact of marine-atmospheric process on aerosol number size distribution in the South China Sea [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(7): 2443–2452. (in Chinese)  
孔亚文, 盛立芳, 刘骞, 等. 海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响 [J]. *环境科学*, 2016, 37(7): 2443–2452.
- [11] James W Fitzgerald. Marine aerosols: a review [J]. *Atmospheric Environment Part A General Topics*, 1991, 25(3–4): 533–545.
- [12] Li Xuebin, Gao Yiqiao, Ji Yufeng, et al. Development of optical particle counter of LED lamp-house [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(3): 406–409. (in Chinese)  
李学彬, 高亦桥, 纪玉峰, 等. LED 光源光学粒子计数器的研制 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3): 406–409.
- [13] Li Xuebin, Gao Yiqiao, Wei Heli, et al. Development of optical particle counter with double scattering angles [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(7): 1528–1534. (in Chinese)  
李学彬, 高亦乔, 魏合理, 等. 双散射角光学粒子计数的研制 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7): 1528–1534.
- [14] Li Xuebin, Hu Shunxing, Zhu Wenyue, et al. Characteristics of aerosol size distribution in Hefei, Yuexi, Xiamen and Beijing [J]. *Journal of Atmospheric and Environment and Optics*, 2011, 6(2): 154–162. (in Chinese)  
李学彬, 胡顺星, 朱文越, 等. 合肥、岳西、厦门和北京气溶胶谱分布特征分析 [J]. *大气与环境光学学报*, 2011, 6(2): 154–162.
- [15] Paul A Baron, Klaus Willeke. Aerosol Measurement: Principle, Techniques, and Applications [M]. 2nd ed. Bai Zhipeng, translated. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 66–79. (in Chinese)  
巴伦, 维勒克. 气溶胶测量: 原理, 技术及应用 [M]. 2 版. 白志鹏, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007: 66–79.