



**中国海洋大学**  
OCEAN UNIVERSITY OF CHINA

# 硕士学位论文

MASTER DISSERTATION

论文题目: 黄渤海海域和北京地区大气气溶胶物理特性研究

英文题目: Study on Physical Properties of Atmospheric Aerosols  
over Huang-Bo Sea and Beijing Areas

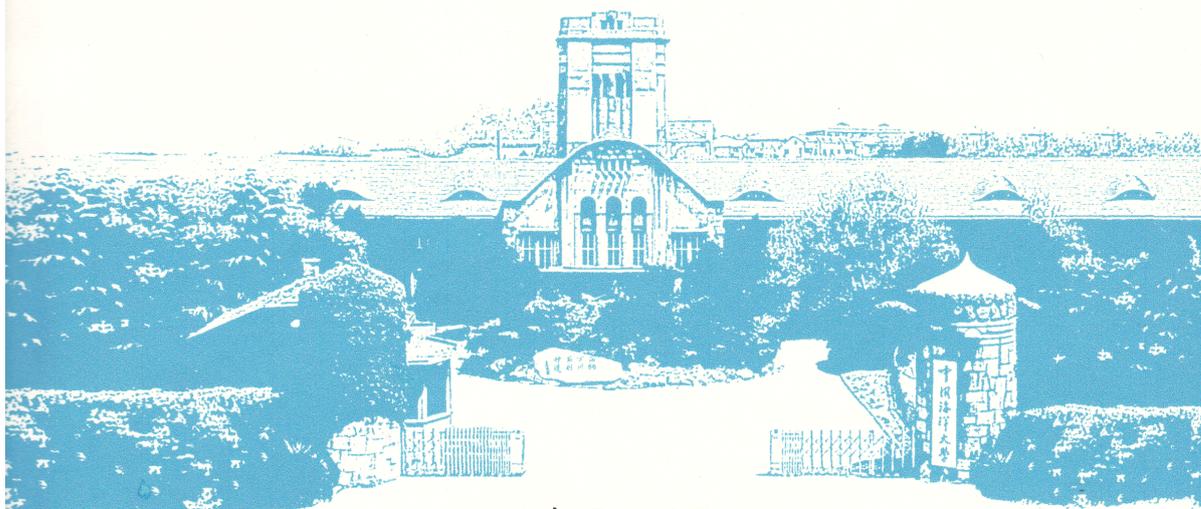
作者: 宋怀荣

指导教师: 阎逢旗

学位类别: 全日制学术学位

专业名称: 摄影测量与遥感

研究方向: 激光扫描三维遥感系统



2013 年 5 月 16 日

谨以此论文献给我敬爱的父母、老师和帮助过我的人

-----宋怀荣

## 黄渤海海域和北京地区大气气溶胶物理特性研究

学位论文答辩日期: 2013年5月20日

指导教师签字: 阎逢祺

答辩委员会成员签字: \_\_\_\_\_

吴东

张齐祜

陈敬忠

丁永健

许素芹

## 独 创 声 明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含未获得（注：如没有其他需要特别声明的，本栏可空）或其他教育机构的学位或证书使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：宋怀荣 签字日期：2013年5月16日

---

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权学校可以将学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：宋怀荣

导师签字：阎逢旗

签字日期：2013年5月16日

签字日期：2013年5月16日

# 黄渤海海域和北京地区大气气溶胶物理特性研究

## 摘要

本文首先利用 2011 年 6 月黄海航次和 11-12 月黄渤海航次上 LAP321 激光气溶胶粒度谱仪的测量数据, 获得并分析了每个站位的大气气溶胶粒子数密度及数密度谱, 探索了气溶胶数密度与风向、风速的关系; 然后采用 AERONET 网站数据研究了北京地区气溶胶粒子体积谱的季节性分布规律, 并讨论了粒子大小与单次散射率的关系等; 最后结合 CALIPSO 卫星数据探讨了大气垂直方向上云和气溶胶的分布特征。

研究发现: 受人类活动影响较大的近岸海域, 气溶胶数密度值比较大, 尤其是粒子半径为  $0.15\mu\text{m}\sim 1.0\mu\text{m}$  的气溶胶粒子。在该海域, 除了沙尘暴等恶劣自然现象的影响之外, 人为活动和雾霾天气是影响气溶胶数密度值增大的主要因素, 而空气相对湿度对气溶胶粒子数密度的影响较小, 可作为辅佐因子考虑。距离海岸较远的海域上, 受人类活动影响较小, 半径在  $1.0\mu\text{m}\sim 2.0\mu\text{m}$  范围的气溶胶粒子主要出现在风源附近, 以及风速由小变大的海域附近, 大部分粒子是由海-气交换等过程产生的较小尺度的海盐气溶胶。影响半径在  $2.0\mu\text{m}\sim 5.0\mu\text{m}$  范围的气溶胶粒子的主要因子是风速, 大风使海表面上的浪花破碎产生飞沫, 从而形成尺度较大的海盐气溶胶粒子。

根据 AERONET 的气溶胶月平均数据, 对北京市大气气溶胶体积谱的季节性变化, 气溶胶体积谱与光学厚度、Ångström 指数、小颗粒比例以及单次散射反照率的关系进行分析。结果表明: 北京市气溶胶体积谱的最大峰值在春季主要由沙尘贡献 (峰值半径约为  $3\mu\text{m}$ , 粗模态), 在夏季主要受温度和湿度的影响 (峰值半径约为  $0.25\mu\text{m}$ , 细模态)。在吸收性粒子浓度较低情况下, 细模态粒子占主导地位时, 单次散射反照率随波长的增大而减小, 粗模态粒子占主导地位时, 单次散射反照率随波长的增大而增大。

根据 CALIPSO 卫星数据, 得到衰减的向散射强度和色比图, 研究了云和大气气溶胶的垂直结构。此外, 在没有不可穿透云的地区, 通过衰减的后向散射和后向散射色比数据, 能有效分辨出陆地和海表面, 即通常情况下, 海表面上色比

$\chi' > 0.2$ ，陆地上色比  $\chi' < 0.2$ 。

关键词：气溶胶；数密度；数密度谱；气溶胶体积谱；小颗粒比例

# Study on Physical Properties of Atmospheric Aerosols over Huang-Bo Sea and Beijing Areas

## Abstract

In this paper, it is obtained and analyzed firstly that many data of aerosol number densities and size distributions measured by laser aerosol particle size spectrometer (LAP-321) during the Yellow Sea voyage in June 2011 and the Huang-Bo Sea voyage in November and December 2011. And the relationships between aerosol number densities and wind direction, wind speed are studied at the same time. Secondly, seasonal characters of aerosols' volume distributions of Beijing are studied by using AERONET data. And the relationships between aerosol size and single scattering rate are discussed as well. Finally, the distributions of clouds and aerosols in the atmospheric vertical direction are discussed by using the CALIPSO satellite data.

Studies find that aerosol number density values are relatively high at the inshore affected by human activities, especially the aerosols with radius of  $0.15\ \mu\text{m} - 1.0\ \mu\text{m}$ . In the area, human activities, fog and haze are the main factors causing the aerosol number density increase, except the impact of dust storms and other severe natural phenomena. Relative humidity isn't very important for number density, so it can be used as adjuvant factor. Aerosols,  $r=1.0\ \mu\text{m} - 2.0\ \mu\text{m}$ , in the sea areas far away from the coast mainly appeared around wind source and high wind speed areas, are less affected by human activities. And those aerosols mainly are small scale sea salt aerosols generated by the sea - gas exchange process. Main factor affecting aerosols with  $r=2.0\ \mu\text{m} - 5.0\ \mu\text{m}$  is wind speed. Big size sea salt aerosols are produced when sprays on the sea surface are broken under the strong wind.

It is analyzed that the seasonal variation of aerosols' volume distributions, aerosols' volume distributions and optical thickness, Ångström exponent, fine mode fraction, and single scattering albedo, by using the monthly mean data of the AERONET site in Beijing. The results show that the maximum peak value of

aerosols' volume distributions in Beijing in Spring is contributed by dust (the maximum peak radius is about 3.0  $\mu\text{m}$ , coarse mode), in Summer it is main affected by higher temperature and relative humidity (peak radius of the volume is 0.25  $\mu\text{m}$ , fine mode). Single scattering albedo will decrease with wavelength increasing when the concentration of the absorbing particles is lower and the fine mode aerosols are dominated. And it will increase as wavelength increasing when the coarse mode aerosols are predominant.

The attenuation backscattering intensity and color ratio figures are calculated according to data of the CALIPSO satellite. And the vertical structures of cloud and aerosols distributions are studied. Meanwhile, main land and sea surface can be distinguished clearly by using the attenuation backscatter coefficient and backscattering color ratio in the case of absence of not penetrate the cloud. That is to say, the sea surface color ratio is  $\chi' > 0.2$ , while the terrestrial color ratio is  $\chi' < 0.2$ .

**Key words: Aerosol, number density, number density distribution, aerosols' volume distribution, fine mode fraction**

# 目 录

1 前言	1
1.1 研究背景、目的和意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 论文的结构和主要内容	6
2 气溶胶的物理光学特性	8
2.1 物理属性	8
2.2 光学属性	11
2.3 本章小结	13
3 激光气溶胶粒径谱仪数据应用实例	14
3.1 激光气溶胶粒径谱仪介绍及工作原理	14
3.1.1 信号处理	15
3.1.2 校正函数	15
3.2 激光气溶胶粒径谱仪的数据结果显示	17
3.2.1 关于 2011 年 6 月份黄海海域气溶胶粒子数密度及谱分析	17
3.2.2 关于 2011 年 11-12 月份黄渤海海域气溶胶粒子数密度及谱分析	24
3.3 本章小结	25
4 基于现场、地基和卫星数据的大气气溶胶物理特性分析	26
4.1 冬季黄渤海海域海表面上空大气气溶胶粒子分布	26
4.1.1 数据介绍及技术路线介绍	26
4.1.2 气溶胶粒子半径 $r \leq 1.0 \mu\text{m}$	29
4.1.3 气溶胶粒子半径 $1.0 \mu\text{m} < r \leq 2.0 \mu\text{m}$	32
4.1.4 气溶胶粒子半径 $2.0 \mu\text{m} < r \leq 5.0 \mu\text{m}$	33
4.2 北京市大气气溶胶粒子体积谱特性分析	35
4.2.1 数据来源	36
4.2.2 北京市气溶胶体积谱季节分布	37
4.2.3 体积谱形态与光学厚度、Ångström 指数及小颗粒比例关系	38
4.2.4 气溶胶粒子大小与单次散射反照率 $\omega_0$ 的关系分析	40

4.3 利用 CALIPSO 卫星观测黄渤海海域上空气溶胶垂直分布.....	42
4.3.1 CALIPSO 数据简介.....	42
4.3.2 区分云和气溶胶的算法.....	43
4.3.3 中国近海地区垂直方向气溶胶分布情况.....	45
4.4 本章小结.....	54
5 总结与展望.....	55
5.1 总结.....	55
5.2 展望.....	56
参考文献.....	57
致谢.....	62
个人简历、在校期间发表的学术论文.....	63

# 1 前言

本章简要论述了大气气溶胶研究的重要意义及国内外的研究进展,提出了论文研究的主要内容——黄渤海海域及北京地区大气气溶胶物理特性研究,并对各章节内容进行简要介绍,为探讨中国区域气溶胶物理特性研究提供依据。

## 1.1 研究背景、目的和意义

大气气溶胶是由各种固体和液体微粒悬浮于大气中形成的弥散系。近年来,由于燃料燃烧、工业污染、沙尘暴等因素的影响,大气中气溶胶粒子明显增多。在大气垂直结构上,气溶胶主要分布在对流层的底层,距离地表几千米以内,对大气能见度、地气辐射平衡和气候、环境等都有重要影响。

地球大气圈的垂直和水平方向上均存在不均一的现象,不同时空的气溶胶粒子的尺度分布不同<sup>[1]</sup>。根据污染、气候和光学模式来分,气溶胶可以分为大陆型、海洋型、乡村型和城市型气溶胶,或大陆型、海洋型、背景型和平流层气溶胶等不同的四类。Whitby<sup>[2]</sup>根据不同地域实际测得的大量气溶胶粒子尺度分布的平均特征,将气溶胶分为以下七类:清洁大陆背景、海洋表面背景、平均大陆背景、背景加老化城市烟羽、背景加局地源、城市平均和城市加高速公路源。

大气气溶胶主要通过直接辐射和间接辐射对全球气候的产生重要影响<sup>[3]</sup>。直接辐射强迫作用主要是指气溶胶对太阳辐射的吸收、散射作用从而直接影响地球的能量平衡;间接效应主要是指气溶胶粒子吸收周围水分形成云凝结核或冰核,从而增加云滴的数密度,减小云滴的半径,延长云的寿命,改变云的微物理和光学特性,以及降低降水效率,进而影响全球的辐射收支平衡<sup>[4]</sup>。

解决气溶胶各参数的不确定性是研究大气气溶胶如何影响气候变化的重点问题。首先,对于直接辐射,由于气溶胶的成分复杂,各成分对辐射的作用效果不同,对全球辐射平衡的影响不同。很多情况下气溶胶的组成成分中,占相当大比例的是硫酸盐气溶胶,它们具有弱吸收性,而此类气溶胶浓度的增加会引起气溶胶光学厚度的增加,进而影响行星反照率的增大,增大对外反射能力,减小地面温度,从而有效抑制温室气体的增温作用。但是对于吸收性很强的大气气溶胶(如黑碳气溶胶),加热大气的同时也会使地面温度降低。其次,对于间接辐射,

由于对流层气溶胶的时空变化比较快、化学成分相对复杂，同时气溶胶、云、辐射等之间非线性关系也相当复杂，因此，对于全球气候变化和大气环流的数值模拟和预测模型中，气溶胶的间接辐射作用成了最不确定因素<sup>[5]</sup>。气溶胶粒子含量的多少和成分的光学性质，以及它们随时空的变化，影响了气溶胶的间接辐射作用，而光学特性通过气溶胶的各类谱结构、光学厚度、单次反照率等来反应，同时，光学特征还与气溶胶的化学成分、相对湿度、风等因素有关，因此，深入开展气溶胶的物理、光学特性的研究，了解其时空分布规律，对于更好地确定全球气候变化模拟和预测模型具有重要的研究意义。

大气气溶胶除了对气候变化有影响外，对环境也有重要影响<sup>[6]</sup>，进而影响人类健康。空气中空气动力学当量直径小于或等于  $2.5\mu\text{m}$  的气溶胶颗粒(PM2.5)，可通过人类呼吸系统，进入人体肺部，引起各类呼吸性疾病，此类粒子富含大量有毒物质，并且在大气中停留时间长、输送距离远等特点，严重影响人类健康。同时，由于其对可见光有明显消光作用，从而导致地面能见度的显著下降。一般而言，PM2.5 粒子主要来自化石燃料的燃烧，例如汽车尾气的排放、化工燃料、生物的燃烧、挥发性气体等大多含有重金属等有毒物质。空气中空气动力学当量直径小于或等于  $10\mu\text{m}$  的颗粒物，称为 PM10。PM10 主要来自道路扬尘等。已有研究表明 PM2.5 对心脏病发作构成的风险，远远超过较大粒子 PM10。世界卫生组织(WHO)指出，PM2.5 的值小于  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  是安全的，但是近年来，在中国的一些地区，特别是工业比较发达的城市，PM2.5 的值已接近  $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。为了有效的保护环境及人身安全，我国于 2012 年 10 月 11 日颁布了新的《环境空气质量标准》，强制要求各省市将 PM2.5 纳入监测范畴。

因此，获得中国地区的气溶胶时空分布和物理、光学特性等系统的科学认识，对了解中国大气气溶胶在全球大气环流和气候变化的作用以及对大气环境的观测有着深远的意义。本论文通过研究黄渤海海域气溶胶数密度谱、北京地区气溶胶粒子体积谱的变化规律和我国一定区域范围内大气气溶胶的垂直分布特征，从水平方向、垂直方向和定点城市对大气气溶胶进行探讨，进而了解中国区域气溶胶的时空分布规律。本论文所使用的数据分别来自现场采集、地基遥感、空间卫星，通过多种形式、多角度的探测手段，进行更全面的研究。

## 1.2 国内外研究现状

为了更好地认识气溶胶的物理光学特性及它们各特性的不确定性因素,国际上先后开展了大量的工作,主要包括建立国际网络化观测点和野外试验等。世界气象组织(WMO)的全球观测(GAW)计划与一些区域观测网络(如美国的 MPROVE、欧洲的 EMEP 和加拿大的 CAPMON)一起提供了一个覆盖全球的气溶胶时空分布的观测数据,有利于对全球气溶胶的长期变化趋势、远距离输送模式进行观测。

IGAC(International Global Atmospheric Chemistry)组织了多次野外实验来观测气溶胶特性。Quinn.P.k 等人在澳大利亚进行了气溶胶特性实验(Aerosol Characterization Experiment, ACE-1),通过研究发现在人为活动影响小的海域,海盐气溶胶占主要成分,决定气溶胶的光学特性,无论是粗粒子( $r \geq 1.0 \mu\text{m}$ )还是细粒子( $r \leq 1.0 \mu\text{m}$ )都有很强的散射效果,而半径在  $0.2-1.0 \mu\text{m}$  的气溶胶散射效率最高<sup>[7]</sup>。Verve.G 等人根据第二次气溶胶特性实验 ACE-2 的数据,分析研究了从欧洲大陆输送到大西洋上空大气中的气溶胶,发现细粒子尺度的气溶胶浓度比较大,细粒子的散射作用占 45%,充分说明气溶胶是从陆地输送到海洋中去<sup>[8]</sup>。而两次实验都说明了局地风速与海盐气溶胶质量浓度没有明显的相关性。Satheesh.S.K 等人通过印度洋海洋组织的 INDOEX(India Ocean Experiment)实验,发现在印度洋上空出现大面积的、棕色的“亚洲灰霾”(Asian Brown Cloud),其组成成分中包含大量碳、硫酸盐和铵盐等<sup>[9]</sup>。灰霾对太阳辐射有很强的散射消弱作用,其包含的碳气溶胶成分对辐射有较强的吸收作用,导致地面降温,同时又由于气溶胶吸热作用引起云的蒸发,使得更多的太阳辐射到达地表<sup>[10]</sup>。Quinn,P.K. 等根据 IGAC 于 2001 年在西太平洋组织的亚洲气溶胶特性试验 ACE-Asia,通过观测对沙尘气溶胶由亚洲大陆输送到西太平洋上空的输送过程,发现含着煤烟粒子的沙尘气溶胶对辐射并没有明显的吸收作用<sup>[11]</sup>,与之前许多学者观点有所区别<sup>[12]</sup>,即一些沙尘气溶胶由于含有煤烟粒子,反而对大气辐射有重要的吸收作用。

近年来,为了更好的对大气气溶胶进行全面性的研究,国际上着重发展了卫星遥感与地基遥感相结合的观测技术,并逐渐发展和改进了针对观测数据进行各种精确计算的反演方法。地基遥感方面,除了上述的 WMO 的全球大气观测计划外,还有 AERONET 太阳光度计全球观测网络<sup>[13, 14]</sup>,以获得全球气溶胶光学特

性和辐射强迫特性,同时可以用来对卫星遥感气溶胶数据的检测和校准。已有许多研究指出关于大气气溶胶直接辐射强迫的评估方法<sup>[15-20]</sup>。气溶胶对辐射间接作用的类型主要是由气溶胶的各种作用而引起的云凝结核和云滴大小来确定的<sup>[21-24]</sup>,所以要了解它对气候的间接效应,首先要了解气溶胶的时空分布、数浓度变化和物理光学特性等。

气溶胶粒子谱可直接反映气溶胶的粒子物理特性。Lidia Morawska等人<sup>[25]</sup>指出气溶胶粒子分布的复杂性是由于其来源的多样性,通过对气溶胶粒子谱的详细研究,能得到大气过程的动态作用引起的对气溶胶粒子谱的效果,粒子大小分布的形态的研究,不仅能够很好地理解大气运动过程的机制,也对空气质量的设置标准和指引起到重要作用。ALF GRINI等人<sup>[26]</sup>对海洋气溶胶进行研究,并建立关于海盐气溶胶浓度、风速、大气辐射的3D模型,用于研究海盐气溶胶与风速等的关系模型。Kiyoshi Matsumoto等人<sup>[27]</sup>指出在北太平洋由于受到亚洲大陆的影响,春秋季节,海面上空的大气气溶胶数密度值比其他季节大的多,然而,即使是在夏季,特别是西北太平洋海洋由于仍然受大陆影响较大,该区域海洋上空大气气溶胶数密度仍然比其他地区大的多。

在大气环流模式和气候模式中<sup>[28]</sup>,对云、气溶胶的描述不够准确,使得进行气候预测时存在很大的不确定性。研究云、气溶胶的垂直结构有着举足轻重的意义,做好这项工作能使我们更深入地了解云、气溶胶在大气环流中所扮演的角色,改进它们在气候模式中的作用等。2006年4月28日,美国宇航局(NASA)与法国空间局(CNES)合作,发射了装载两个波段(532nm和1064nm)的激光雷达卫星CALIPSO(Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)。作为地球观测系统(EOS)卫星群之一,CALIPSO的数据可以让我们更加充分地了解云和气溶胶的时空分布情况,精确量化云、气溶胶的辐射效应。CALIPSO卫星上装载的垂直偏振云-气溶胶激光雷达CALIOP,在不少情况下能够透过薄卷云观测到其下面的云层和气溶胶层,因此它能够为我们提供气溶胶和云层的空间垂直分布情况。

近年来,我国将大气气溶胶研究列为国家重点研究项目。2006年中国气象科学研究院组织了“中国大气气溶胶及其气候效应的研究”;2011年中国科学院遥感应用研究所承担的全球变化重大科学研究计划(973)“多尺度气溶胶综合观

测和时空变化规律研究”取得重大进展；2011年中国气象科学研究院的《气溶胶-云-辐射反馈过程及其与亚洲季风相互作用的研究》也在进行中；2012年中国环境科学学会大气环境分会在青岛举行会议，关注中国区域大气气溶胶与大气环境的关系问题。

目前，我国已有诸多学者针对大气气溶胶的监测、反演、物理特性、化学特性等进行研究。吕达仁<sup>[29]</sup>等人通过测量直接消光和小角散射来确定气溶胶的粒子谱和光学厚度。邱金桓<sup>[30]</sup>等人利用该方法得到了粒径为0.1~10 $\mu\text{m}$ 范围的气溶胶粒子谱信息。赵崴<sup>[31]</sup>等人使用太阳辐射计对黄海和东海海域上空的气溶胶光学特性进行了观测，采用Langley方法得到该海区上空春季的气溶胶光学厚度，并反演出气溶胶粒子谱。韩冰<sup>[32]</sup>等人用自动观测太阳光度计(CE318)数据，根据非线性辐射传输理论，探索了由辐射数据反演出气溶胶粒子谱、散射相函数等气溶胶物理特性的方法，并结合南海海域的观测数据，得到较好的反演效果。林鹏<sup>[33]</sup>等指出在受人为污染影响较严重的海面上空的大气气溶胶数密度谱，其形态是单峰结构，在受人为影响较小的远海海域，其上空大气气溶胶数密度谱的形态是双峰结构。吕子峰<sup>[34]</sup>等人根据国外学者的研究，对二次有机气溶胶生成潜势的估算方法进行改进，对二次气溶胶的监测提供了一定的依据。对于中国近海，也有大批学者进行研究。邓学良<sup>[35]</sup>利用MODIS数据分析了我国近海海域气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Thickness, AOT)和小颗粒比例(Fine Mode Fraction, FMF)的时空变化及尺度分布，指出冬季AOT的大值区域是沿海岸线分布，随着离岸距离的增加而AOT的值减小，春季与冬季的分布特点类似，但是由于风沙等因素的影响，使得春季的AOT整体数值比冬季大的多。秋季与冬季、春季有类似的分布情况，但是数值要小一些，而夏季东海及南海的AOT明显变小，大部分地区的AOT数值小于0.17；FMF的特征与AOT的分布情况类似，小颗粒比例越大，说明人为因素对气溶胶影响越大。丛丕福<sup>[36]</sup>等利用MODIS的Level 3数据，通过查算表、拟合等方法对黄渤海上空的气溶胶光学厚度和Ångström指数进行反演。董文<sup>[37]</sup>研究了中国北黄海海区大气气溶胶光学特性，指出气溶胶光学厚度与体积谱的值变化是基本一致的，例如在阴霾天气条件下，光学厚度的增加，相应的体积谱的值也在变大。在阴霾天气条件下，粗粒子含量较高，体积谱的值较大，而粒径体积谱反映了气溶胶大粒子和小粒子的相对浓度。进入21世

纪以来,随着改革开放的不断深化,国民经济迅速发展,气溶胶源也越来越多样化,研究气溶胶粒子谱有助于更好的认识气溶胶源,对我国大气气溶胶的研究有重要的意义。

另外,李积明等人<sup>[28]</sup>利用 CALIPSO 卫星的云层数据产品,通过对东亚地区云的垂直分布特征的研究,发现在东亚地区,多层云云量和云顶、云底的高度随季节变化显著,同时也有明显的区域特征,平均云层厚度大约在 0.9-2km 范围之内,而云层间距在 0.35km 的概率占到将近 50%左右。赵一鸣等人<sup>[38]</sup>利用 2008 年 7 月 17 日的 CALIPSO 卫星数据,针对地理坐标为(14.11°E, 40.50°N)的位置,对气溶胶、云、沙尘等进行去偏振分析,指出目标的后向散射去偏振度信息,能够有效地分辨出大气气溶胶的组成成分、目标的垂直高度等信息,判断出海拔 8km 以上有卷云,海拔 6-7km 是一层相对湿度较大的沙尘暴,在海拔为 1km 处为气溶胶层。激光雷达为探测大气垂直剖面上气溶胶的分布特征提供了很好的观测资料,特别是近年来 CALIPSO 卫星数据为我们提供了云-气溶胶衰减后向散射强度、光学厚度、垂直消光系数等信息,为研究全球大气环流和气候模式、大气污染输送监测等提供了新的思路。

### 1.3 论文的结构和主要内容

本文旨在开展中国区域气溶胶物理光学特性的研究。近年来,我国诸多学者对大气气溶胶进行监测、反演、建模分析等,得到了较好的研究成果,充分认识了气溶胶物理、光学特性。本文继承了前人的研究成果,但重点研究气溶胶在中国近海区域的整体分布特征,包括水平方向和垂直方向。本文共分为五章,各章内容如下:

第一章 简述了大气气溶胶的研究背景,详细介绍了国内外大气气溶胶的研究现状,并指出了本论文对黄渤海海域和北京地区气溶胶进行研究的的目的和意义。

第二章 概述了大气气溶胶物理光学特性的基础知识,其中包括气溶胶的尺寸分类、粒子谱分类、光学厚度、单次散射反照率、折射率等。

第三章 介绍了激光气溶胶粒径谱仪的结构和观测原理,以及气溶胶粒子参数的反演算法,并对该仪器所获取的数据进行应用分析。

第四章 对 2011 年 11-12 月出海的数据进行详细分析，得出每个站位的气溶胶粒子数密度分布情况，以及探索了气溶胶数密度与风向、风速的关系，并采用 AERONET 网站数据研究了北京地区气溶胶粒子体积谱的季节性分布规律，最后结合 CALIPSO 卫星数据探讨了大气垂直方向上气溶胶的分布特征。

第五章 对本论文的研究结果进行简单总结，并提出下一步计划。

## 2 气溶胶的物理光学特性

本章主要对气溶胶物理光学特性的基本参数进行介绍,为中国区域气溶胶特性的研究奠定理论基础。

### 2.1 物理属性

#### (1)大气气溶胶粒子的形状和尺寸

大气气溶胶粒子的尺寸范围可达 5 个数量级<sup>[39]</sup>— $10^{-3}$ ~ $100\mu\text{m}$ ,即从几个分子组成的分子团到几十微米的云粒和灰尘粒子。按照尺度大小的不同,大气气溶胶粒子可以分为三种<sup>[2]</sup>:爱根核( $0.001\mu\text{m} < r < 0.1\mu\text{m}$ )、大粒子( $0.1\mu\text{m} \leq r \leq 1.0\mu\text{m}$ )和巨粒子( $r > 1.0\mu\text{m}$ )。按照尺度分布模态的不同,大气气溶胶粒子尺度分布通常分为三个分离的模态:核模态( $r < 0.05\mu\text{m}$ ),该范围的粒子主要是在高温环境或化学过程产生的蒸汽凝结核;积聚模态( $0.05\mu\text{m} \leq r \leq 1.0\mu\text{m}$ ),该范围内的粒子主要是核模态中的小粒子凝聚,或者是直接通过蒸汽凝结长大而成;粗模态( $r > 1.0\mu\text{m}$ ),该范围的气溶胶粒子主要是起源于地球表面的陆地和海洋,由液滴蒸发或机械粉碎等作用而形成。当然,随着人类活动的愈加频繁,气溶胶各范围粒子的形成过程也严重受到人类活动引起的各类污染源的影响。此外,常用的特征尺度范围的概念通常还有细质粒( $r \leq 1.0\mu\text{m}$ )和粗质粒( $r > 1.0\mu\text{m}$ )。大气气溶胶粒子的实际形状是多种多样的,但在分析气溶胶粒子的光学特性的实验中,往往会将气溶胶粒子假定为球形,最近几年也有学者逐渐将粒子假定为椭球形。

#### (2)大气气溶胶的粒子浓度

气溶胶浓度<sup>[40]</sup>是指单位体积(通常为  $\text{cm}^3$ )空气中所含一定尺度范围内的气溶胶颗粒的个数、表面积、体积、质量,分别称为数浓度( $\text{cm}^{-3}$ )、表面积浓度( $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ )、体积浓度( $\mu\text{m}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )和质量浓度( $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )。气溶胶的数浓度变化范围很大,直径小于  $1\mu\text{m}$  的气溶胶数浓度在  $10 \sim 10^6 \text{cm}^{-3}$  范围内。

#### (3)气溶胶粒子谱

常用的气溶胶粒子尺度分布可以用以下函数来描述,即 1963 年提出的 Junge 分布函数、1969 年的 Diermendjian 提出的  $\Gamma$ -分布函数和 1978 年 Whitby 的对数

正态分布函数，以及美国的 NOVAW(Navy Oceanic Vertical Aerosol Modal)模式。

1) Junge 谱分布(又称负幂指数谱分布)

$$n(r) = \frac{dN(r)}{dr} = Ar^{-(v+1)} \quad (2-1)$$

式中， $r$  是假定为球形的气溶胶粒子的半径， $v$  是 Junge 参数。但是 Junge 谱模式只适用于模拟积聚模态粒子的分布<sup>[1]</sup>。一般地， $v$  在 2 和 4 之间变化， $v \approx 2$ ，表征了很多雾， $3 < v < 4$  符合典型的霾现象。

2)  $\Gamma$ -分布(又称指数分布)

在一定条件下，大气气溶胶在核模态出现极大值，其中半径小的一侧，浓度迅速下降，半径大的一侧浓度缓慢减少，其分布可以用指数函数  $n(r) = r \exp(-br)$  来描述，其中在  $r = b^{-1}$  处达到极大值。

1969 年，Diermendjian<sup>[41]</sup> 提出修正的  $\Gamma$ -分布作为经验拟合函数，

$$n(r) = ar^\gamma \exp(-br^\beta) \quad (2-2)$$

上式中有 4 个可调参数，即  $\alpha$ ， $b$ ， $\beta$ ， $\gamma$ ，都是正实数( $\gamma$  为正整数)。

表 2-1 给出了不同类型下，关于气溶胶的修正  $\Gamma$  谱参数的情况。

表 2-1 不同类型气溶胶粒子的修正  $\Gamma$  谱参数值

类型	$\alpha$	$b$	$\gamma$	$\beta$
海洋型粒子谱	$5.33 \times 10^4$	8.94	1.0	0.5
大陆型粒子谱	$4.97 \times 10^6$	15.12	2.0	0.5
未扰动的平流层	324	18	1.0	1.0
火山喷灰平流层	5461	16	1.0	0.5

1981 年，游荣高根据我国城市气溶胶的尺度(直径为  $0.3 \sim 10 \mu\text{m}$ ) 谱特点，提出三参数的经验公式：

$$n(r) = ar^b \exp(-cr) \quad (2-3)$$

其中， $a$ ， $b$ ， $c$  为拟合参数。

3) 对数正态分布<sup>[1]</sup>

以上介绍的两种模拟函数均局限于一定尺度范围，而且仅适用于一种权重因子(如数浓度)，然而大量的实测数据表明，气溶胶的尺度谱，尤其是表面积谱、

体积谱或质量谱在对数坐标中都呈现多个正态分布,大多数情况下为两个或三个正态分布。Whitby 等提出了对数正态分布函数,其表达式为:

$$n(r) = \frac{dN}{d \lg r} = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi} \cdot \ln \sigma_{gm}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_{gm})^2}{2 \ln^2 \sigma_{gm}}\right] \quad (2-4)$$

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi} \cdot \ln 10 \cdot r \cdot \ln \sigma_{gm}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_{gm})^2}{2 \ln^2 \sigma_{gm}}\right] \quad (2-5)$$

其中,  $r_{gm} = (r_1 \cdot r_2 \cdots r_n)^{\frac{1}{N}}$ , 或者  $\ln r_{gm} = \int_0^\infty \ln r f(r) dr = \overline{\ln r}$ ;

$$\ln \sigma_{gm} = \left[ \frac{\sum_i n_i (\ln r_{gm} - \ln r_i)^2}{\sum_i (n_i - 1)} \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ 或者 } \ln \sigma_{gm} = \left[ \frac{\int_0^\infty (\ln r_{gm} - \ln r)^2 n(r) dr}{\int_0^\infty n(r) dr} \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$n_i = \frac{n(r)}{N}。$$

式中,  $N_0$  是单位体积(一般为  $\text{cm}^{-3}$ )大气中的粒子总数;  $r_{gm}$  和  $\sigma_{gm}$  为描述正态分布的两个特征参数,分别叫做几何平均半径(即峰值半径)和几何标准偏差(即峰的平均宽度),  $\ln r_{gm}$  和  $\ln \sigma_{gm}$  分别称为对数平均半径和对数标准偏差。只要选择合适的参数,原则上,对数正态分布(包括它们的叠加)基本可以用来描述整个尺度范围内的气溶胶粒子谱分布。值得注意的是若数密度谱为对数正态分布,则其表面积谱、体积谱和质量浓度分布也是对数正态分布。

#### 4) NOVAW 模式<sup>[40]</sup>

依据远海和近岸海域上空气溶胶的观测,美国海军提出了 NOVAW 模式,即海军海洋垂直气溶胶模式。该模式考虑了四个气溶胶模式,分别代表工业气溶胶粒子、水溶性粒子、稳定海盐粒子和新生海盐粒子。与对数正态分布略有所不同,每一种模态的分布函数可表示为:

$$n(r) = \frac{dN(r)}{dr} = \frac{A}{f} \exp\left(-\ln^2\left(\frac{r}{r_0}\right)\right) \quad (2-6)$$

式中,  $r_0$  是模态半径,对于工业气溶胶粒子和水溶性粒子,根据经验值,  $r_0$  为  $0.03\mu\text{m}$ ; 对于稳定海盐气溶胶粒子和新生海盐气溶胶粒子,  $r_0$  分别为  $0.24\mu\text{m}$  和

1.0 $\mu\text{m}$ 。A 是振幅; f 是膨胀因子, 与相对湿度 RH 有关, 通常情况下, 在 RH=80% 时, f=1。基于上面的四种模态, 可定义两种气溶胶类型, 即: 一种称为人为气溶胶; 另一种为海洋性气溶胶。

在气溶胶模型中<sup>[42]</sup>, 虽然通常以数密度谱 $n(r)$ 作为气溶胶谱参数的定义, 但实际上更多情况下, 使用表面积谱 $S(r)=4\pi r^2 n(r)$ 和体积谱 $V(r)=(4/3)\pi r^3 n(r)$ 来描述气溶胶的物理信息。表面积谱表示气溶胶粒子可提供的表面积, 气溶胶体积谱能够体现出大气中悬浮的气溶胶粒子总量, 一定程度上, 气溶胶粒子的体积谱与质量浓度分布有相似的结构形状, 只是有权重系数的区别。根据体积谱、相函数等所对应的权重函数, 分析出特定波长的反射率主要来自哪些尺度粒子的贡献, 从而根据反射率波长反演出粒子尺度的分布情况。

虽然理论上气溶胶体积谱在粒子半径取对数时有三个模态, 但是通常实际情况下只有两个峰值。核模态粒子在数密度上呈现很大的比例, 但是在浓度上只是比较小的比例, 在体积谱上几乎看不到。在核模态出现峰值的情况一般分为两种: 一种情况是位于接近源的热蒸汽; 另一种情况出现在冷凝点很低的时候<sup>[25]</sup>。城市地区, 在高气溶胶数密度值和快速凝结的情况下, 强排放源处能监测到核模态的粒子, 例如汽车尾气, 在这种设定好的背景条件下, 这个实验(监测汽车尾气)中有没有尾气的的作用, 表明核模态和很少量的粗模态粒子是由交通产生的, 全部的积聚模态粒子和绝大部分的粗粒子具有区域性, 是大面积作用的结果。大量的实验表明, 在体积谱和质量浓度分布的形态中, 即使是在机动车的排放源处(此处有大量的核模态粒子), 也只有积聚模态和粗模态。

## 2.2 光学属性

### (1) 气溶胶光学厚度

光学厚度是大气气溶胶的重要参数之一, 反映了大气污染浑浊程度。大气气溶胶对辐射消光能力的反映, 可以定义为衰减系数沿传播路径上的积分。气溶胶散射的计算比较复杂, 对于积聚模态气溶胶粒子, 在使用 Junge 谱模型描述气溶胶尺度分布的假设下, Ångström 指出<sup>[43]</sup>了气溶胶光学厚度和波长的经验关系, 即:

$$\tau_{aer}(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (2-7)$$

两边取对数可以得到:

$$\ln \tau_{aer} = \ln \beta - \alpha \ln \lambda \quad (2-8)$$

式中,  $\tau_{\text{aer}}$  是气溶胶光学厚度(无量纲);  $\lambda$  是波长( $\mu\text{m}$ );  $\beta$  是浑浊度系数, 与气溶胶粒子浓度有关, 其大小范围一般为 0~0.5。当大气比较清洁时  $\beta \leq 0.1$ ; 当大气比较浑浊时  $\beta \geq 0.2$ 。 $\alpha$  是 Ångström 波长指数<sup>[43]</sup>, 与气溶胶粒子尺度有关, 粒子尺度越大,  $\alpha$  值越小, 相反粒子尺度越小,  $\alpha$  值越大。当  $\alpha < 1$  时, 表明气溶胶粒子较大 ( $r \geq 0.5 \mu\text{m}$ ), 如沙尘, 海盐; 当  $\alpha > 2$  时, 表明气溶胶粒子较小, 如城市污染物、燃烧生成物。

气溶胶光学厚度与波长的关系可以用高次多项式来拟合<sup>[44]</sup>:

$$\ln \tau_{\text{aer}}(\lambda) = a \ln \beta + b \ln \lambda + c(\ln \lambda)^2 \quad (2-9)$$

有研究指出<sup>[45-48]</sup>, 当  $\alpha \approx 2$  时, 主要是小粒径的烟雾粒子; 当  $1.1 \leq \alpha \leq 2.1$  时, 气溶胶类型为城市-工业气溶胶; 当  $1.1 \leq \alpha \leq 1.8$  时, 主要为海盐气溶胶; 当  $-1 \leq \alpha \leq 0.5$  时, 主要是沙尘气溶胶。

## (2) 单次散射反照率 $\omega_0$

单次散射反照率表示一次散射过程中散射光强在整个削弱光强过程中所占的比例<sup>[49]</sup>, 反应了大气对辐射的散射和吸收性的强弱。 $\omega$  值越大, 说明大气的散射效果越强;  $\omega_0$  值越小, 则说明大气的吸收性越强, 表达式为:

$$\omega_0 = \frac{k_s}{k_s + k_a} \quad (2-10)$$

式中,  $k_s$  和  $k_a$  分别为散射系数与吸收系数。在给定波长的情况下, 单次散射反照率也可表示为气溶胶散射光学厚度与气溶胶总光学厚度之比, 即  $\omega_0 = \tau_{\text{sca}} / \tau_{\text{ext}}$ 。 $\omega_0$  的变化对地球上的太阳辐射平衡有重要影响<sup>[50]</sup>, 主要取决于介质的折射指数。

## (3) 相函数

相函数是气溶胶散射相函数的简称, 用来表达在不同角度下散射能的情况, 是研究光束与粒子相互作用的重要途径之一<sup>[51-55]</sup>, 可以用来反映气溶胶粒子大小和形状的信息。大气中气溶胶粒子的形状是多种多样的, 常用的简化模型是球形和椭球形粒子模型<sup>[50]</sup>, 比较经典的米散射理论解决了球形粒子的散射相函数。

## (4) 折射率

大气气溶胶的折射率可以由下式来表示:

$$\mathbf{n} = n_r - i \cdot n_i \quad (2-11)$$

$n_r$  表示折射率实部, 主要与光散射作用有关系;  $n_i$  表示折射率虚部, 主要与光吸收

作用有关系。在实际情况中，大气气溶胶由于成分中含碳量不同，且随着波长和粒子尺度而变化，引起折射率的虚部变化范围相当大，导致折射率的测量有一定难度。目前，常用的方法是，利用能见度仪<sup>[56]</sup>、微脉冲激光雷达和光学粒子计数器，得到气溶胶消光系数、消光后向散射比、粒子谱分布，通过它们与粒子折射率之间的关系，反演出气溶胶粒子的折射率。

#### (5) 小颗粒比例

FMF 是小颗粒( $r \leq 1.0\mu\text{m}$ )气溶胶光学厚度与总气溶胶光学厚度的比例，即  $\text{FMF} = \tau_{\text{fine}} / \tau_{\text{total}}$ 。FMF 值越大，小粒子占的比重越大，FMF 值越小则大粒子的比重较大。由人类活动产生的气溶胶例如硫酸盐气溶胶等主要是小颗粒气溶胶，而自然源气溶胶例如沙尘和海盐粒子，主要是大颗粒气溶胶，所以在一定程度上，可以通过 FMF 来区分人为源气溶胶和自然源气溶胶，这有利于了解我国海域气溶胶粒子分布特征和形成原因<sup>[35]</sup>。

### 2.3 本章小结

本章介绍了气溶胶的物理属性：粒子形状和尺寸、粒子浓度和尺寸分布的各种谱结构，而粒子浓度又包括数浓度(数密度)、表面积浓度、体积浓度和质量浓度。气溶胶光学属性包括：光学厚度、单次散射反照率、相函数、折射率和小颗粒比例等。本论文通过数密度、数密度谱和体积谱的结构形态来分析研究区域气溶胶的分布特征，结合光学属性来区分各个尺寸范围内气溶胶粒子，并以此来判定气溶胶的来源。

### 3 激光气溶胶粒径谱仪数据应用实例

在对大气气溶胶物理参数进行了阐述之后,本章结合激光气溶胶粒径谱仪采集到的气溶胶数密度数据,主要对黄渤海海域实测的气溶胶数密度和数密度谱的特征进行分析。

#### 3.1 激光气溶胶粒径谱仪介绍及工作原理

激光气溶胶粒径谱仪(Laser Aerosol Particle Size Spectrometer, LAP321)是一种光源为激光的光学粒子计数器(Optical Particle Counter, OPC),它根据 Mie 散射理论,利用粒子的光散射特性测量单分散气溶胶粒子的数密度谱和数密度。

该仪器能测量的最大气溶胶粒子数密度为  $10^5\text{cm}^{-3}$ 。与该仪器配套使用的 PASW 软件,安装在 Windows 应用程序中,能控制仪器的操作。需要一个 PC 串口,将 LAP321 的微处理单元与电脑中的应用软件 PASW 链接起来,进而控制仪器的测量并计算气溶胶粒子尺度。

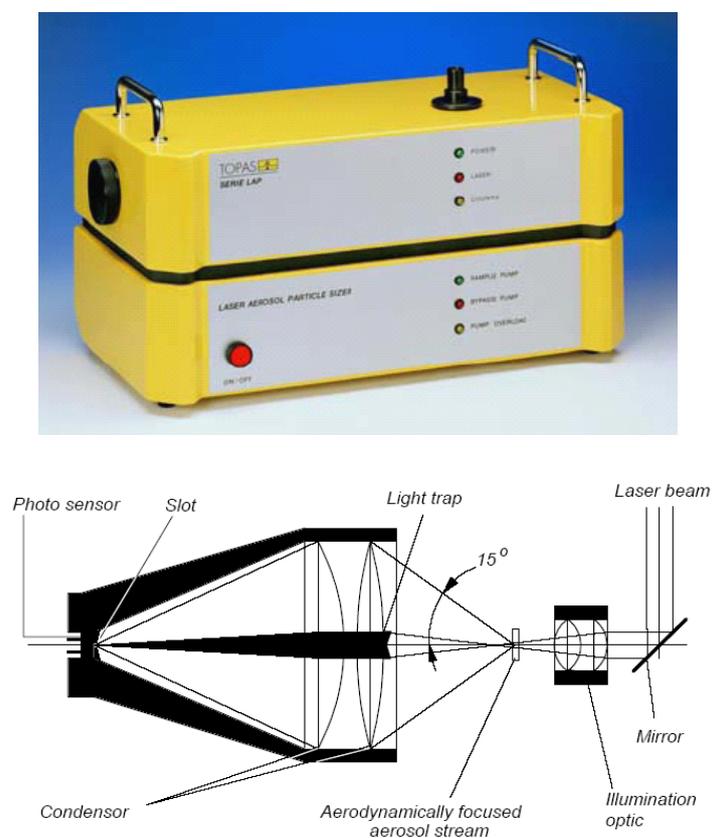


图 3-1 LAP321 及其光学装置的示意图

图 3-1 显示了气溶胶粒子如何经过照明、监测和测量区域，其中氦氖激光作为光源，有 128 个散射光通道，它们是通过校正函数确定气溶胶粒子尺度的基础。技术方案的基础是创建一个测量容器，对于高浓度气溶胶粒子来说，它要足够小。需要三个平面来满足构建测量容器，它们分别是：激光束平面，气溶胶流平面，光通槽(散射光通过它到达光传感器)，其结构分布如图 3-2 所示。

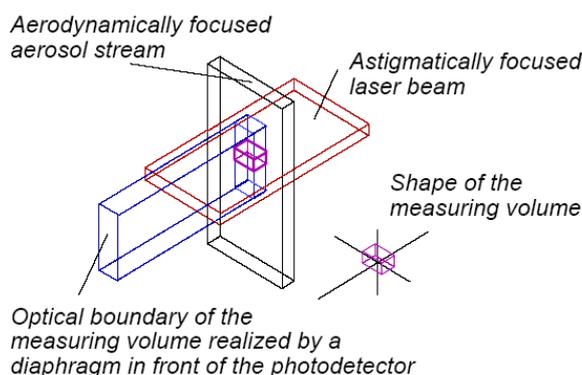


图 3-2 形成测量体积的三个平面示意图

这种方法形成的检测区，优点是减少来自内部表面散射光、高强度且均匀散射光的影响。整个测量范围的直径为  $0.3\mu\text{m}$ - $20\mu\text{m}$ ，已经证实，当数浓度低于  $10^5\text{cm}^{-3}$  时，很少发生计数错误，但是当数浓度超过这个限度时，应进行稀释。

### 3.1.1 信号处理

由测量容器内的颗粒引起的散射光信号经雪崩光电单元转换为电脉冲，根据光散射理论，脉冲高度与光学几何直径相一致。光信号的脉冲高度和多通道的关系如图 3-3。放大后的信号将被内部微处理器进行分类，分成 4906 个通道(多通道分析)，这个 16 位的微处理器进行数据压缩至 128 个级别，在轮询模式下通过接口被转移到计算机应用程序中。该仪器的控制和数据采集软件 PASWin，利用仪器特定的检验数据，计算出自各个通道的粒子尺度。

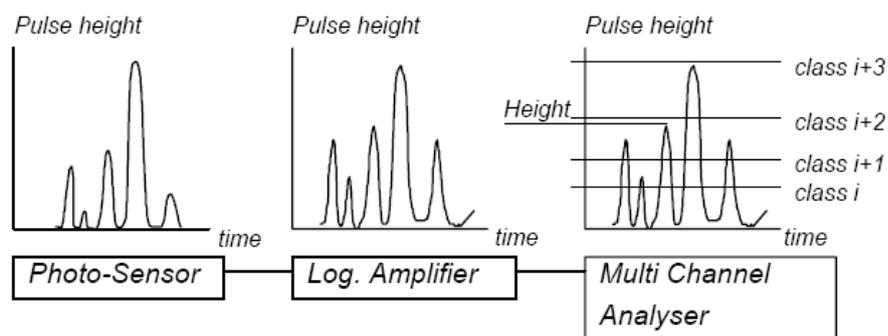


图 3-3 脉冲高度分析和多通道分析图

### 3.1.2 校正函数

依据仪器特定的校正数据，各个通道被转换成几何颗粒尺寸，各峰值的信道编码与特定粒子大小有关，通过评估信道数的直方图得到，而直方图又是根据单分散粒径标准形成的。不同粒径测量是基于 5 阶的多项式函数来计算的，这个函数用来描述仪器特定粒径和各粒径的通道编码(如图 3-4 所示)。

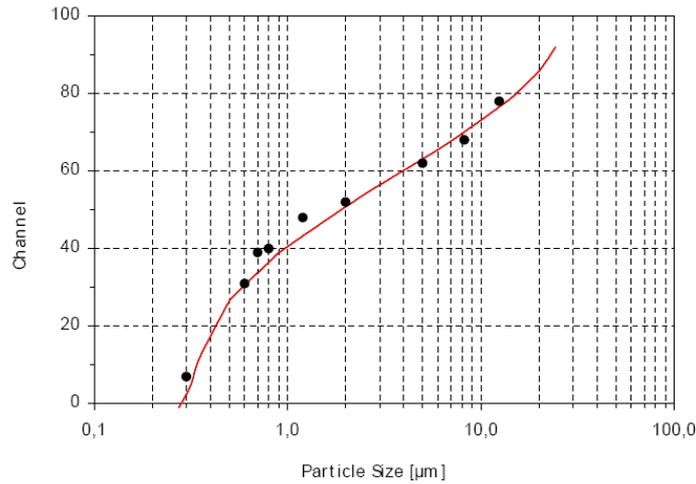


图 3-4 校正函数图象，黑点代表校正数据，线描述的是通过数学回归得到的多项式曲线

每台仪器在出厂前单独校准，而且校准函数保存在设备上，扩展名为.cfg 的文件作为备份保存在 PC 机上的 PASWin 软件目录下。粒径与通道的相关性由一个 5 阶的多项式函数描述，表达式如下：

$$d_p = 10^{(A_0 - 1 + A_1CH + A_2CH^2 + A_3CH^3 + A_4CH^4 + A_5CH^5)} \quad (3-1)$$

两边取对数，得到下面表达式：

$$\log(d_p) = A_0 + A_1CH + A_2CH^2 + A_3CH^3 + A_4CH^4 + A_5CH^5 \quad (3-2)$$

有一个关于通道编码与相对应粒子直径的表格，用来拟合多项式曲线，如图 3-5 和表 3-1 所示。同样地，离散校正也被保存在设备中。测量峰值信道号和颗粒大小，通过数学回归分析得到的，并自动生成一个表格。电子表格也提供了误差分析，从而优化了整个过程的处理结果。

表 3-1 通道编码与相对应粒子直径

#	Particle size ( $\mu\text{m}$ )	Channel (measurement)	Channel (calculation)
1	0.250		-5.0
2	0.300	7	4.0
3	0.350		12.0
4	0.480		26.0
5	0.600	31	30.0
6	0.701	39	36.0
7	0.800	40	39.0
8	1.200	48	49.0
9	2.000	52	54.0
10	5.010	62	62.0
11	8.220	68	68.0
12	12.470	78	78.0
13	15.000		80.0
14	20.000		86.0
15	25.000		92.0

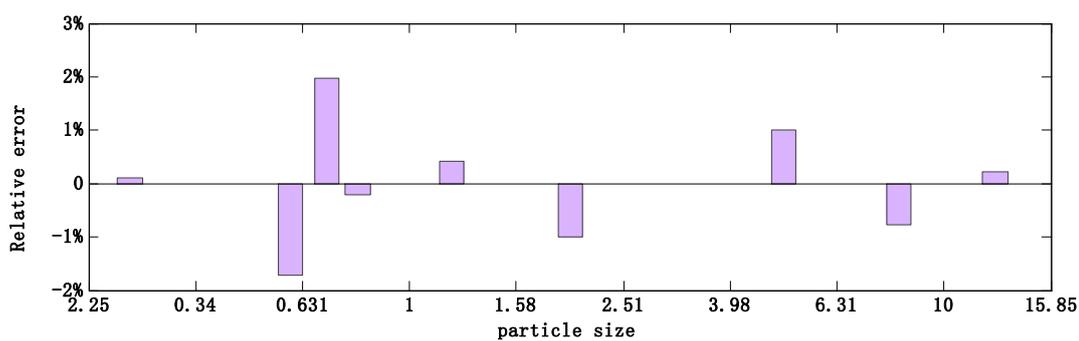


图 3-5 电子表格中的测量编码的拟合分析以及误差分析

### 3.2 激光气溶胶粒径谱仪的数据结果显示

下面对 2011 年 6 月和 2011 年 11-12 月利用激光气溶胶粒径谱仪测量的黄渤海海域的气溶胶粒子现场数据进行分析。

## 3.2.1 关于 2011 年 6 月份黄海海域气溶胶粒子数密度及谱分析

2011 年 6 月 13、14、15、18、21、24、25、27、28 日，随科考船在黄海采集共计 1415 分钟 283 组数据(5 分钟/组)，求出气溶胶粒子数密度和数密度谱，整理出日平均数据后进行多角度分析。

## 1) 平均结果

图 3-6(a)是日平均数密度的情况，显示出不同天气状况下，气溶胶数密度有所不同，星号线和五角方块线分别表示当日气溶胶粒子直径大于等于  $0.3\mu\text{m}$  和  $0.306\mu\text{m}$  的平均结果显示。图 3-6(b)是当日每五分钟平均的结果。从图 3-6(a)(b)不难发现，直径大于等于  $0.3\mu\text{m}$  的气溶胶粒子在 6 月 13 日、18 日、远远多于直径大于等于  $0.306\mu\text{m}$  的粒子。

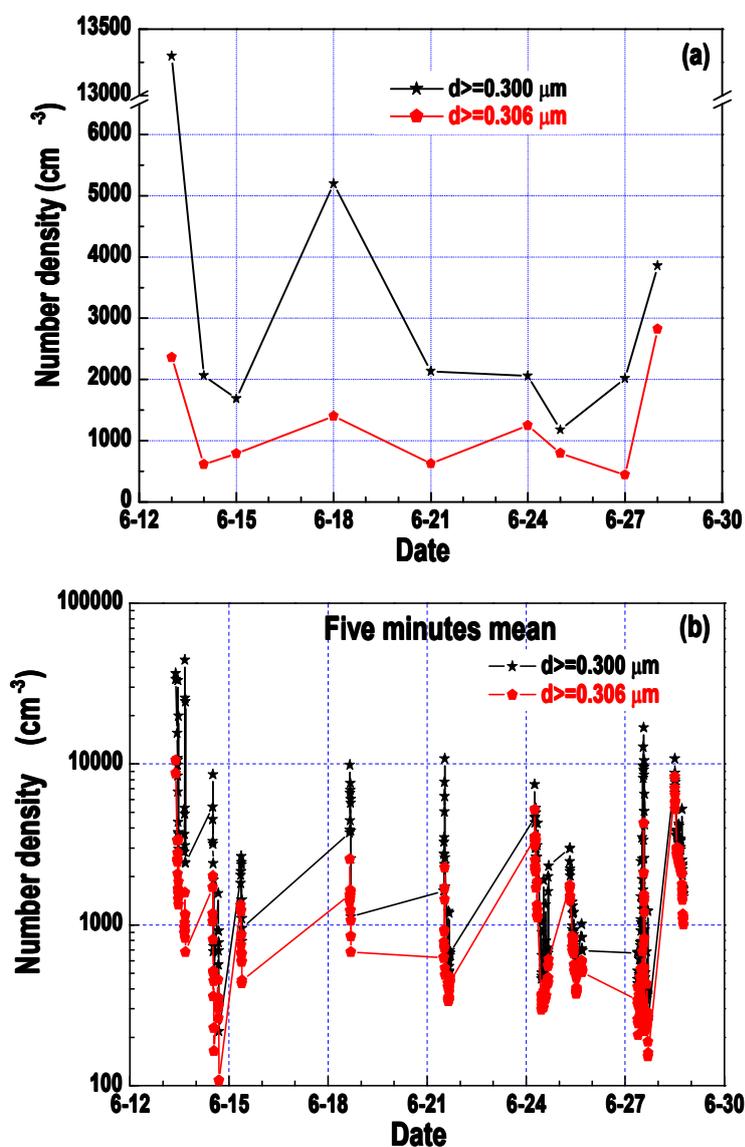


图 3-6 气溶胶粒子数密度的日变化

气溶胶数浓度不同的情况下，数密度谱基本一致，在直径为  $0.3-10\mu\text{m}$  的范围内，呈现 Junge 谱分布和指数分布形态，即  $n(r) = ar^b \exp(-cr)$ 。但是在直径为  $0.3-0.306\mu\text{m}$  范围内的粒子，却显示出数密度异常多的特征。由图 3-7 可以看到，三角线代表气溶胶粒子比较少少的情况，圆线表示气溶胶比较多的情况，矩形线表示所有数据平均后的结果，由图 3-7(a)(b) 我们发现，直径在  $0.3-0.306\mu\text{m}$  范围内的气溶胶粒子数目占很大比例，即使是在相对环境比较清洁的地区，此范围内粒子数密度值仍然很大。直径在  $0.1-1\mu\text{m}$  范围的气溶胶有可能是海上有机气溶胶、硫酸铵气溶胶和生物燃烧后产生的气溶胶、煤烟气溶胶等。

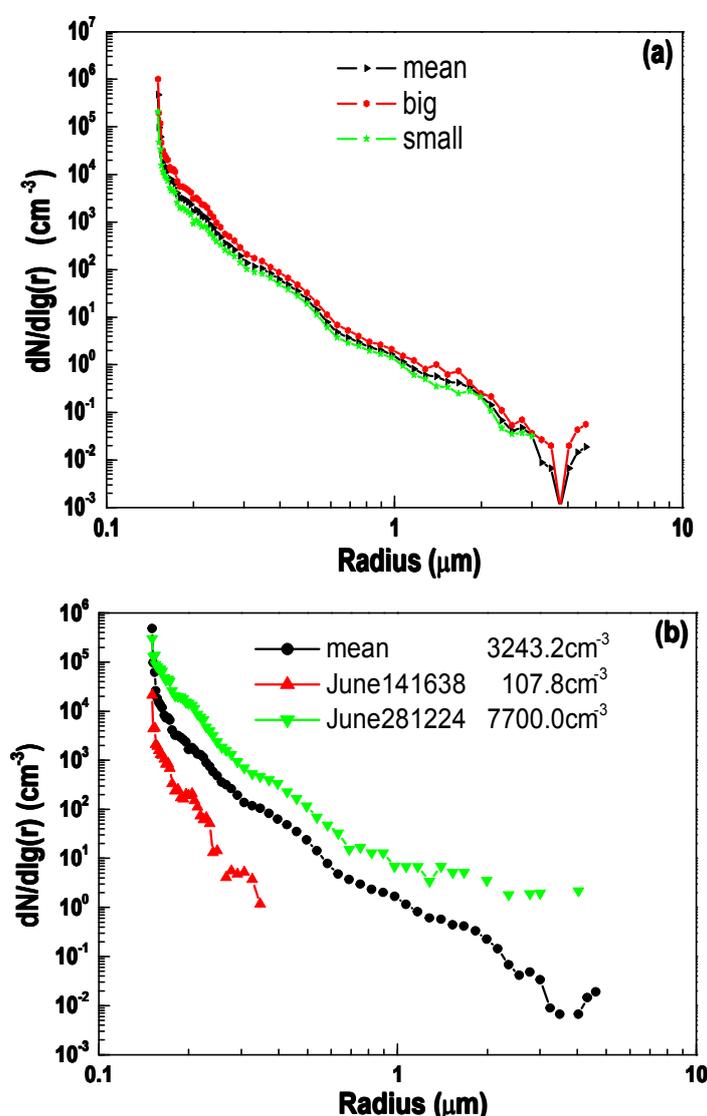
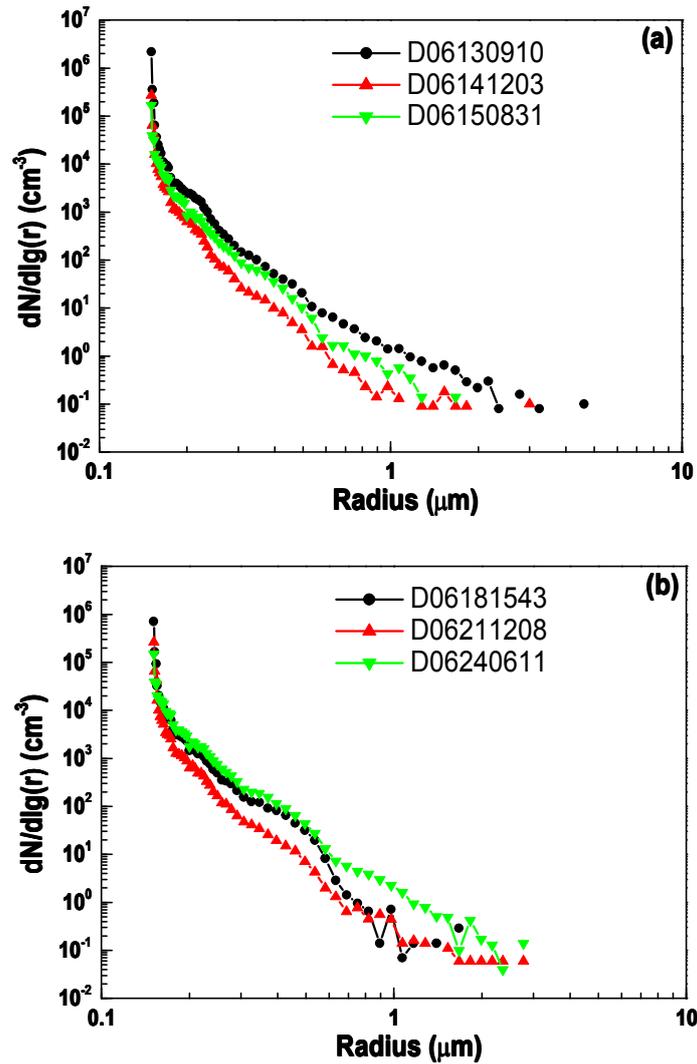


图 3-7 气溶胶粒子数密度谱的日变化

数密度谱能有效地展现气溶胶粒子在不同尺度范围的分布情况，图 3-8 显示了日均气溶胶粒子的数密度谱情况，可以看到，半径为  $0.15-0.153\mu\text{m}$  的气溶胶

粒子的数密度远远大于其他尺寸的粒子数密度。同时，不同尺寸的粒子分布不是同步的，例如图 3-8(a)中的 6 月 14 日 12:03 和 6 月 15 日 08:31 的数据，在半径为 0.15-0.153 $\mu\text{m}$  的范围，前者比后者大，但是在大于 0.153 $\mu\text{m}$  的尺度，后者都大于前者；3-8(b)中 6 月 18 日 15:43 和 6 月 24 日 06:11 的数据，半径在 0.15-0.2 $\mu\text{m}$  的范围，前者比后者大或者相等，但是在大于 0.2 $\mu\text{m}$  的范围，后者比前者大；3-8(c)中，在半径为 0.15-0.153 $\mu\text{m}$  的范围，6 月 27 日 08:57 的数密度值最大，但在大于 0.153 $\mu\text{m}$  的尺度范围内，却是最小的。



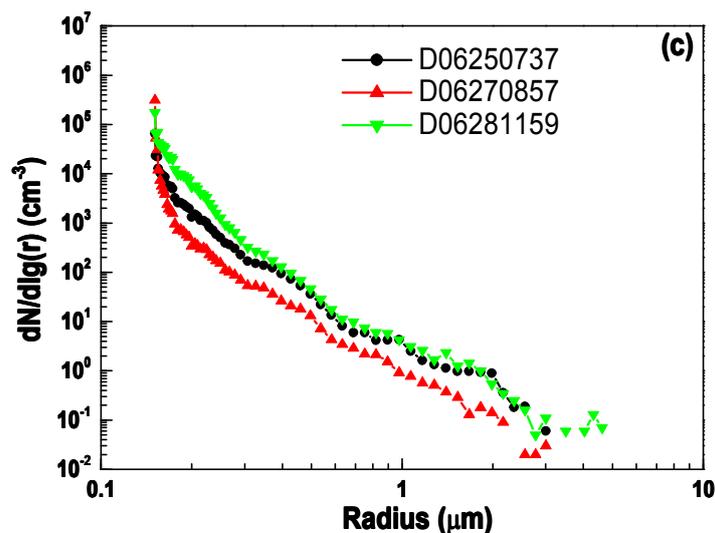
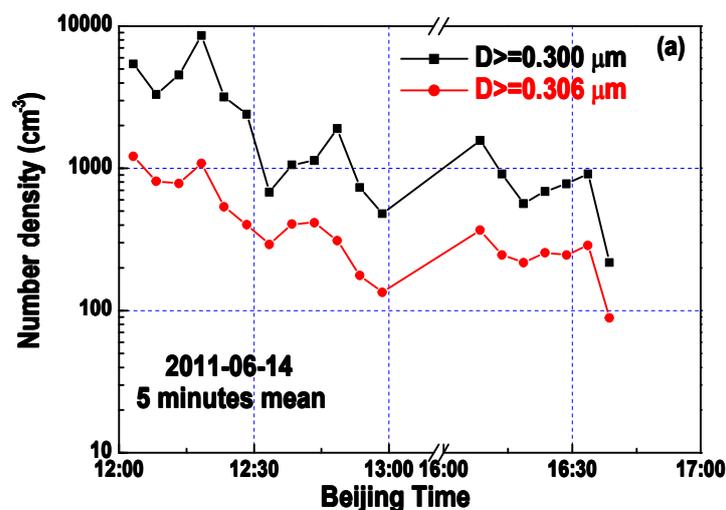


图 3-8 日均大气气溶胶粒子数密度谱

## 2) 个例分析

根据实测数据, 针对同一地点不同时刻的气溶胶粒子, 将其划分不同尺度范围, 进行定量分析。图 3-9(a)中, 发现一天当中同一地点, 12 点左右的气溶胶粒子数目比较大, 在之后的时间段内, 虽然数密度值有所起伏, 但总体趋势是变小的, 同时我们还发现直径在  $0.3-0.306\mu\text{m}$  的气溶胶数目粒子比重相当大, 占总量的 50%左右。图 3-9(b)看到, 在特殊情况下, 粒子数目会有异常增大的现象, 说明在当时气流不稳定, 或者大气流动过程中携带了相当数目的气溶胶粒子。从数据的异常可以判定当时采集地点出现高浓度气溶胶情况, 有利于我们对周围环境进行探查。



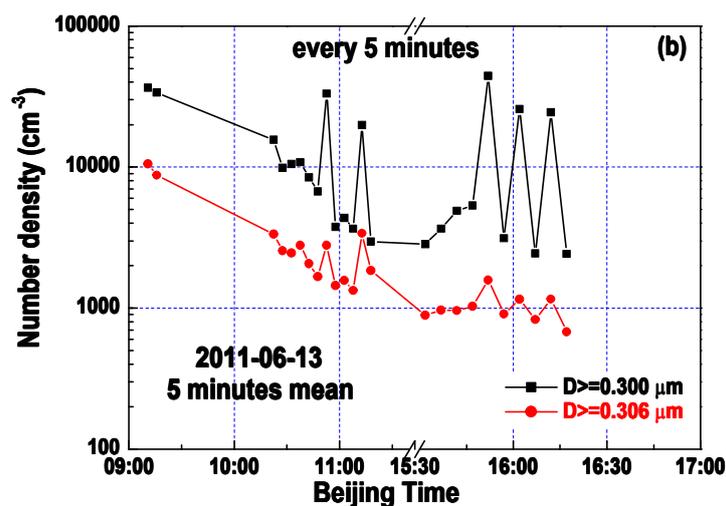
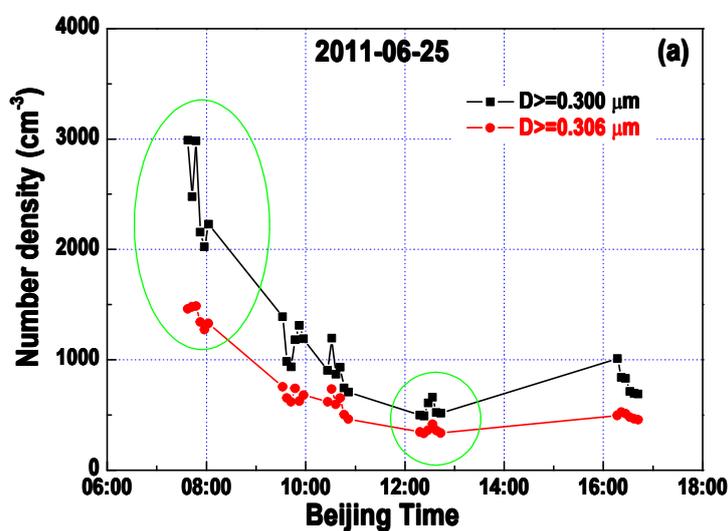


图 3-9 气溶胶粒子数密度随时间的变化

图 3-10 显示了在 2011 年 06 月 25 日，气溶胶粒子数密度较小情况下数密度谱的分布情况，7:37 和 12:18 时刻出现气溶胶粒子数最多和最少的两个时间段，对这两个时间段的气溶胶粒子数密度谱进行观测，发现粒子尺度范围在 0.3-4 $\mu\text{m}$  左右，在直径为 0.3-0.306 $\mu\text{m}$  范围内的粒子数比其他尺度的数密度值大一个数量级，同时由于此范围段的粒子数占总量的 50%左右，它的增加对总量的增大有决定性的影响。



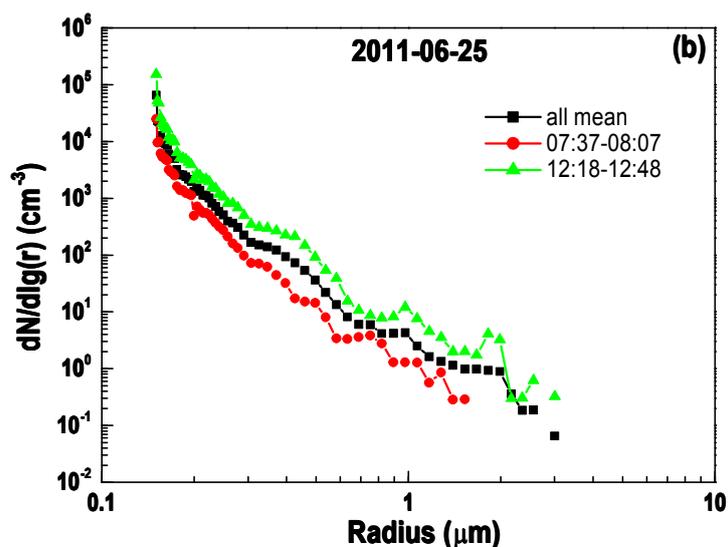
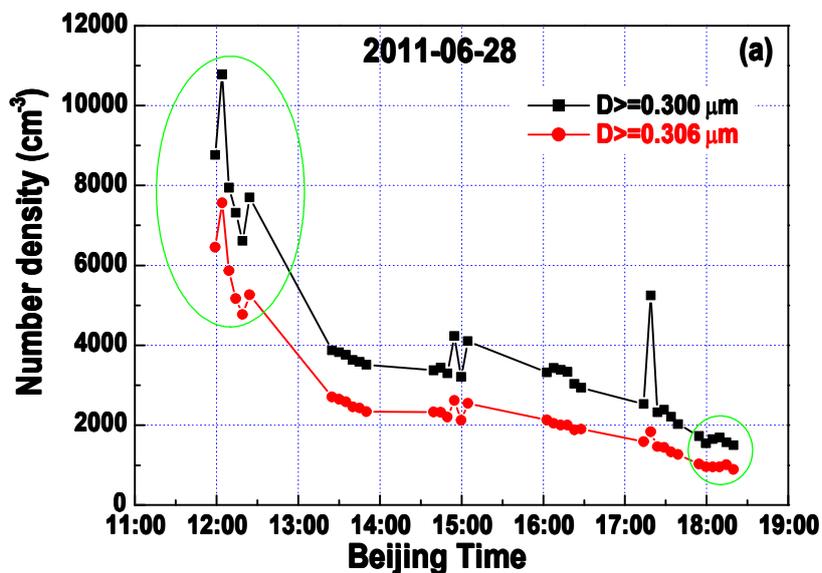


图 3-10 气溶胶粒子数密度较小情况下的数密度谱

图 3-11 显示了在 2011 年 06 月 28 日, 气溶胶粒子数密度较大情况下数密度谱的分布情况, 12:00 和 18:00 时刻出现气溶胶粒子数最多和最少的两个时间段, 对这两个时间段的气溶胶粒子数密度谱进行观测, 发现粒子半径范围在  $0.15\text{-}6\mu\text{m}$  左右。半径为  $0.15\text{-}0.153\mu\text{m}$  范围内的粒子数比其它尺度数密度值大一个数量级, 同时, 在环境相对较浑浊的地区, 半径为  $2.5\text{-}6\mu\text{m}$  范围内有分布, 而较清洁地区在此半径范围内并没有数据。



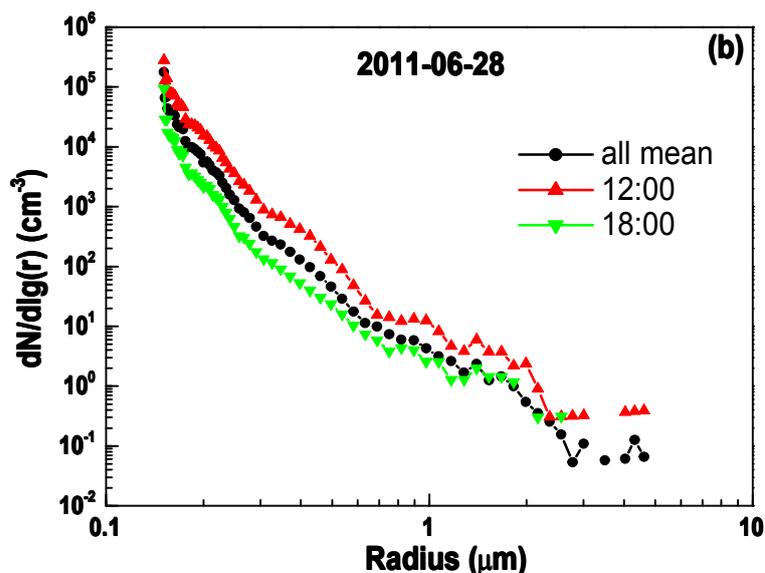


图 3-11 气溶胶粒子数密度较大情况下的数密度谱

### 3.2.2 关于 2011 年 11-12 月份黄渤海海域气溶胶粒子数密度及谱分析

2011 年 11 月 20 日至 12 月 6 日,随科考船在黄渤海采集 59 个站点共计 1535 分钟 307 组数据(5 分钟/组), 并求出气溶胶粒子数密度和数密度谱, 整理出日平均数据。

由图 3-12 可以看到, 日平均气溶胶数密度的值变化范围比较大, 这是由当日的天气状况确定的。同时还发现, 直径在  $0.3\text{-}0.5\mu\text{m}$  范围内气溶胶粒子数密度都大于  $10^3\text{ cm}^{-3}$ , 有的甚至达到  $10^5\text{ cm}^{-3}$ , 而直径大于  $0.5\mu\text{m}$  的粒子数密度几乎都在  $100\text{ cm}^{-3}$  之下, 当直径大于  $2.5\mu\text{m}$  时, 粒子数密度都小于  $1\text{ cm}^{-3}$ 。

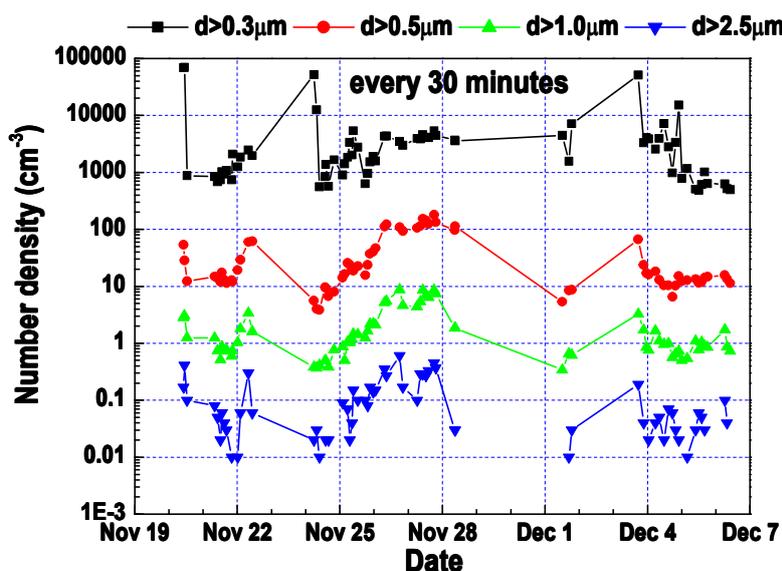


图 3-12 各站点的大气气溶胶粒子数密度

2011年11-12月份, 站位 H01 的数密度大于  $10000\text{ cm}^{-3}$ , 站位 B23 的数密度小于  $600\text{ cm}^{-3}$ , 它们的数密度谱分布如图 3-13, 从图中我们发现 H01 站位的气溶胶粒子除了数目比较多外, 粒子尺度范围也比 B23 站位的大, H01 的粒子半径范围为  $0.15\text{-}4\mu\text{m}$ , B23 站位的粒子直径范围为  $0.15\text{-}2\mu\text{m}$ 。

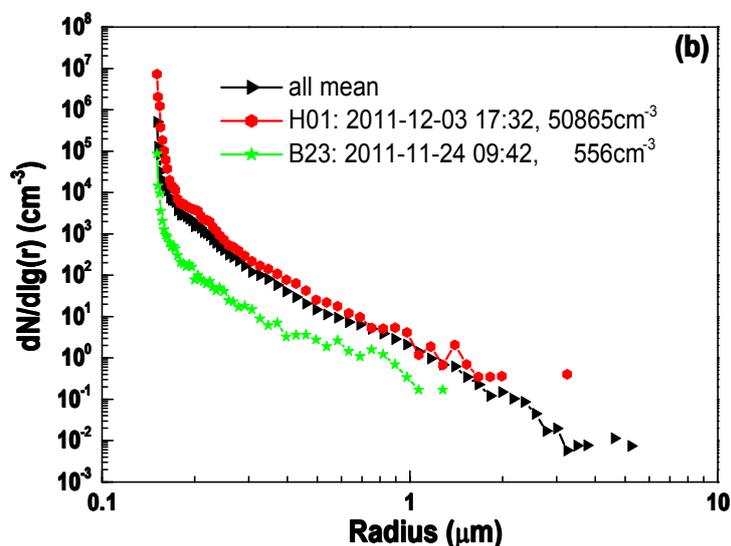


图 3-13 气溶胶粒子数密度谱(数密度大于  $10000\text{ cm}^{-3}$ 、小于  $600\text{ cm}^{-3}$  及总平均)

### 3.3 本章小结

本章介绍了激光气溶胶粒径谱仪的基本工作原理, 并根据 2011 年 6 月份和 11-12 月份的激光气溶胶粒径谱仪的实测数据, 得到了日变化下不同尺寸范围的气溶胶粒子数密度和同日不同时段情况下不同尺度范围的气溶胶数密度变化的情况, 以及它们对应的数密度谱。结果发现气溶胶数密度和数密度谱能够很好地反映气溶胶浓度的变化, 以及粒子尺度与浓度的关系。气溶胶粒子尺度在一定程度上可以反映气溶胶粒子的来源, 从而为研究中国区域气溶胶的分布特征提供了理论基础。

## 4 基于现场、地基和卫星数据的大气气溶胶物理特性分析

本章节的主要内容是利用现场采集的气溶胶数密度数据、AERONET 地基网站的气溶胶各参数数据和 CALIPSO 卫星的后向衰减散射系数数据，对大气气溶胶的物理光学特性和区域范围内气溶胶在水平、垂直方向的分布特征进行分析。

### 4.1 冬季黄渤海海域海表面上空大气气溶胶粒子分布

#### 4.1.1 数据介绍及技术路线介绍

##### 1) 观测站点气象数据和站位图

在这一节中，我们只根据激光气溶胶粒径谱仪 LAP321 采集的，2011 年冬季 (11 月 20 日-12 月 6 日)黄渤海区域海表面气溶胶粒子数据，进行各种处理分析。调查船为中国海洋大学东方红 2 号科考船。仪器采集的数据粒子半径的范围为  $0.153\mu\text{m}$ - $5.0\mu\text{m}$  左右，根据不同粒子大小在不同站位的分布信息，我们可以得到黄海、渤海海域，气溶胶粒子数密度在水平方向上的分布特性。

2011 年冬季航次的出海时间为 11 月 20 日到 12 月 6 日，大约 17 天的时间，记录的 59 个站位数据，各个站位的时间不是统一的，有的是在早上，有的是在中午，有的是在晚上。在本航次进行时，也记录了当时的天气状况，比如相对湿度、风速、风向、有无雾霾等气象信息，如表 4-1。图 4-1 显示了这个航次的黄渤海海区有数据的观测站位图。

表 4-1 各个站位的日期、时间、经纬度、天气状况

站位	日期	时间	经度	纬度	风向 (°)	风速 (m/s)	RH (%)	天气 状况
B02	2011.11.21	08:02:00	122°57.286	36°27.289	358	6.3	54.7	晴
B03	2011.11.21	10:04:00	122°47.773	36°39.179	279	1.7	53.7	晴
B05	2011.11.21	13:17:00	122°39.025	36°59.03	258	1.5	47.8	晴
B06	2011.11.21	14:57:00	122°52.495	36°59.623	44	2.1	48.7	晴
B07	2011.11.21	16:31:00	123°10.368	36°59.548	359	3.0	53.3	晴
B09	2011.11.21	20:27:00	123°42.423	36°59.016	36	7.2	54.4	晴
BZ1	2011.11.22	00:13:00	123°44.350	37°14.749	214	7.7	51.1	晴
BZ2	2011.11.22	02:17:00	123°29.554	37°28.928	220	8.0	62.8	晴
B13	2011.11.22	07:51:00	123°14.814	38°08.276	129	1.3	57.8	阴,薄雾
B14	2011.11.22	10:33:00	123°28.683	38°25.928	141	5.8	66.9	阴,薄雾
BF1	2011.11.24	05:45:00	122°31.439	38°58.789	358	1.3	49.8	晴
B22	2011.11.24	07:44:00	122°29.942	38°44.854	129	0.4	53.5	晴

B23	2011.11.24	09:42:00	122°29.443	38°26.523	153	1.5	59	晴
B25	2011.11.24	13:40:00	122°29.059	38°00.001	263	8.0	70.9	晴
B26	2011.11.24	15:58:00	122°28.650	37°46.704	244	5.8	56.4	晴
B28	2011.11.24	19:58:00	121°59.420	37°42.141	298	4.7	44	晴
B31	2011.11.25	01:56:00	121°59.846	38°29.639	331	3.8	63.8	晴
B32	2011.11.25	03:22:00	122°00.197	38°40.068	3	5.2	78.2	晴
B33	2011.11.25	05:28:00	121°37.544	38°40.068	13	5.7	68.7	晴
B34A	2011.11.25	07:00:00	121°24.497	38°38.099	71	5.8	71.9	多云
B35	2011.11.25	08:31:00	121°19.413	38°25.137	79	5.3	71.8	晴
B36	2011.11.25	09:26:00	121°16.021	38°15.963	76	2.2	47.4	晴
B38	2011.11.25	12:42:00	121°09.575	37°54.613	165	4.7	58.3	晴
B39	2011.11.25	17:51:00	120°44.431	38°20.701	142	5.8	54.8	晴
B40	2011.11.25	19:32:00	120°27.192	38°20.350	155	7.3	54.7	晴
B41	2011.11.25	21:12:00	120°11.530	38°20.128	165	8.5	62.5	阴,有雾
BY01	2011.11.25	23:27:00	120°08.292	38°38.339	290	3.7	74.5	阴,有雾
B44	2011.11.26	07:22:00	119°12.761	38°19.044	143	0.5	76.3	阴,雾
B45	2011.11.26	08:43:00	119°00.089	38°19.070	68	2.8	70.6	阴,雾
B50	2011.11.26	18:02:00	119°42.705	39°18.492	92	6.5	62.6	阴,雾
B51	2011.11.26	20:15:00	120°03.946	39°10.980	93	5.9	66.1	阴,雾
B60	2011.11.27	06:18:00	120°14.363	39°19.145	327	5.6	75.2	阴,雾
B61	2011.11.27	08:35:00	119°53.596	39°02.757	168	5.4	70.3	阴,雾霾
B62	2011.11.27	10:17:00	119°40.078	38°52.156	279	4.5	76.8	阴,雾霾
B63	2011.11.27	12:34:00	119°22.739	38°38.086	77	2.9	73.4	阴,雾霾
B64	2011.11.27	14:14:00	119°09.611	38°28.287	96	1.6	77.2	阴,雾霾
B65	2011.11.28	08:45:00	119°19.156	37°55.112	81	6.5	83.8	阴,雾霾
BF2	2011.12.01	12:12:00	119°51.693	37°43.436	18	8.9	59.8	晴
B70	2011.12.01	16:49:00	120°06.716	37°43.341	49	5.7	63.4	多云
B71	2011.12.01	18:50:00	120°17.842	37°56.824	43	5.9	63.6	多云
H01	2011.12.03	17:32:00	121°00.580	35°58.076	19	9.1	71.1	多云
H03	2011.12.03	21:19:00	121°39.867	35°58.183	356	9.5	66.3	多云
H04	2011.12.03	23:20:00	121°59.352	35°57.962	346	8.5	64.7	多云
H05	2011.12.04	01:17:00	122°19.536	35°57.903	356	9.9	65.9	多云
H07	2011.12.04	05:31:00	122°59.985	35°57.844	348	9.9	67.5	多云
H09	2011.12.04	11:35:00	123°29.957	35°30.123	128	4.9	60.2	多云
H10	2011.12.04	14:47:00	123°29.720	34°59.352	65	4.8	61.4	多云
H11	2011.12.04	17:36:00	123°00.071	34°59.948	7	6.2	62.5	多云
H13	2011.12.04	21:57:00	122°20.165	35°00.875	23	5.6	58.9	多云
H14	2011.12.05	00:04:00	122°59.592	35°00.31	49	5.4	56.9	多云
H16	2011.12.05	03:54:00	121°20.085	34°59.823	57	4.9	59.3	多云
H22	2011.12.05	09:51:00	121°20.018	33°59.992	73	9.4	67.7	多云
H23	2011.12.05	12:00:00	121°40.031	34°00.031	58	9.5	63.8	多云
H24	2011.12.05	13:59:00	121°58.970	33°58.717	201	6.8	61.6	多云
H25	2011.12.05	16:06:00	122°19.782	34°00.086	97	7.8	59.6	多云

H26	2011.12.05	18:13:00	122°39.590	34°01.862	45	7.1	66.3	多云
H33	2011.12.06	06:18:00	122°59.631	33°00.130	258	4.3	73.2	多云
H34	2011.12.06	07:50:00	122°40.470	33°00.128	234	9.5	76.5	多云
H35	2011.12.06	10:09:00	122°20.641	33°00.391	239	7.3	74.3	多云

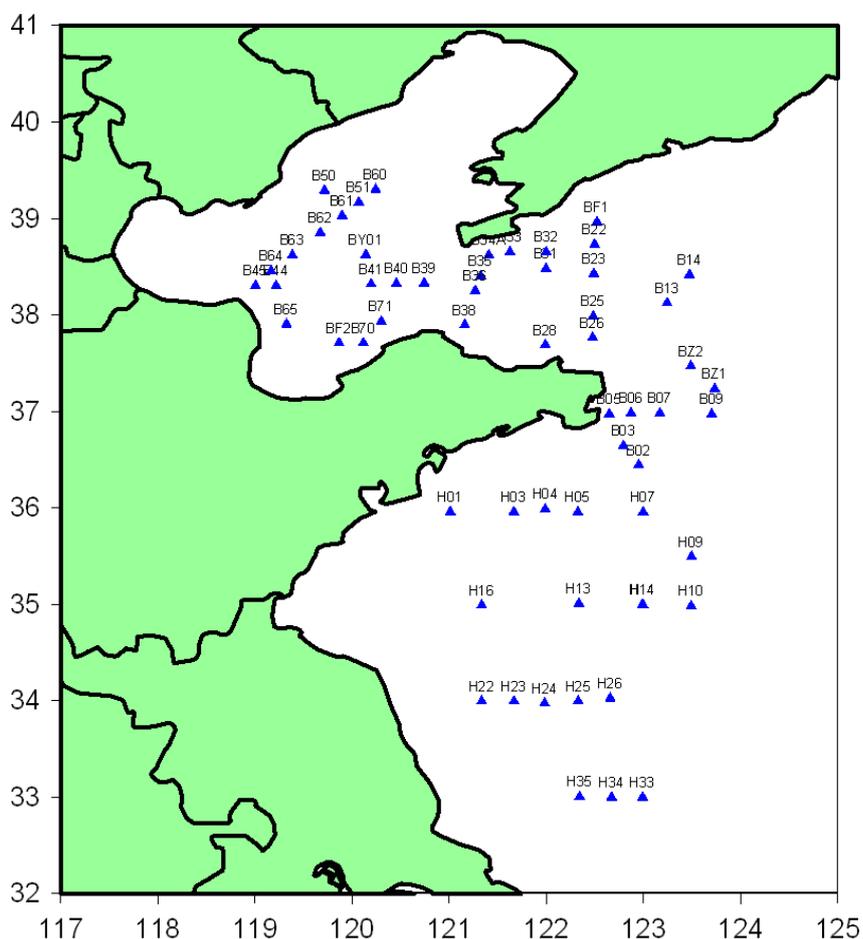


图 4-1 黄渤海 2011 年 11 月航次站位信息图

## 2) 观测站的风向和风速

图 4-2 显示了不同站位风向和风速大小，箭头的方向代表风向，长度和颜色代表风速的大小，右侧色标指示了风速的大小，红色表示风速大，蓝色表示风速小。从图 4-2 中可以看到在渤海和北黄海处有几股风流存在：来自山东半岛北侧和辽东半岛西侧的风吹向渤海湾内，并在湾内的核心处停息；山东半岛东南部 (36°N, 122.8°E) 的黄海海域处有一股风源，吹向四面各个方向；来自山东半岛南部的风和辽东半岛东侧的风一起相互作用吹向渤海湾出口，并在此停息；在黄海 (34.5°N, 121.2°E) 处的海域存在另一股风源，向东、东北、东南、西南方向吹去，同时西南方向的风碰到安徽省的陆地后被转向，吹向了另外两个方向：向北吹向

山东半岛和向东吹向黄海远海处。

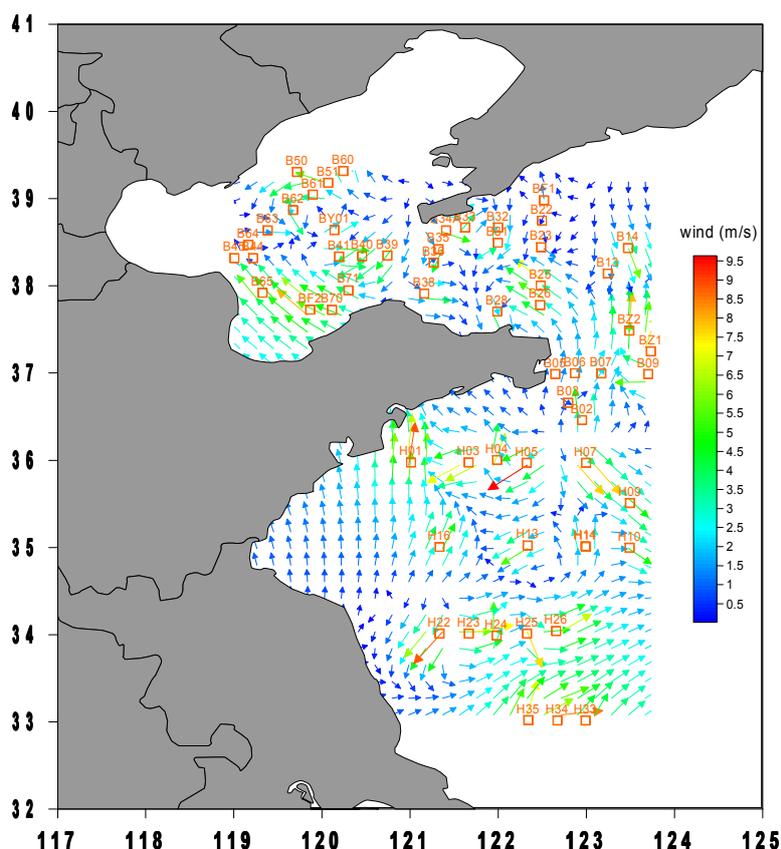


图 4-2 各个站位的风向、风速图

### 3) 数据处理

LAP321 的采集周期设置为 5 分钟，即每五分钟有一个数据记录，一段时间（通常为 5 分钟的  $N$  倍）就会有  $N$  个数据记录。因此，首先对数据进行一些处理，以方便我们的研究。

(1) 对每个站点的  $N$  个数据记录求平均，即每个站位一定时间内的平均数。

(2) 求气溶胶数密度。一定时间内，必然存在一定的体积，为了统一比较，必须先求出单位体积内气溶胶粒子数，即得到气溶胶数密度。

(3) 获得一个含有站位名称、经纬度和不同尺度数密度的数组。

(4) 最后，得到不同尺度的气溶胶数密度在各个站位的等值分布图。

#### 4.1.2 气溶胶粒子半径 $r \leq 1.0 \mu\text{m}$

根据各个站位观测的数密度数据，选择几个比较典型的粒子尺度在黄渤海海域的分布情况，进行分析研究，如图 4-3 所示（右侧的色标：粒子数密度， $\text{cm}^{-3}$ ）。

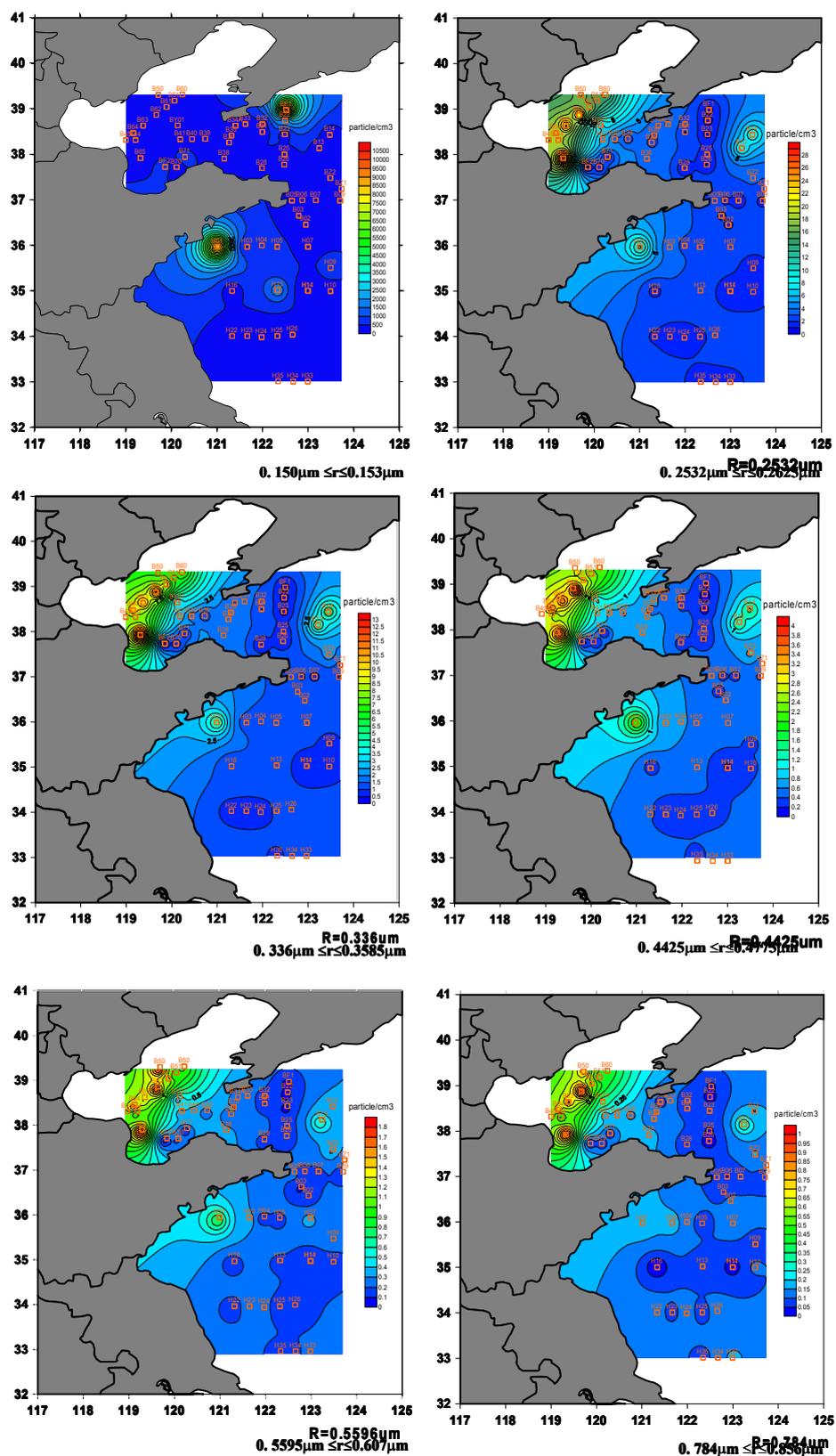


图 4-3 半径  $r \leq 1.0\mu\text{m}$  的气溶胶数密度黄渤海海域的分布情况

如图 4-3 所示，随着气溶胶粒子尺度的增大，粒子数密度有所减小。半径

$r \leq 1.0 \mu\text{m}$  的气溶胶粒子分布形式比较相近, 在各个粒子尺度, 渤海湾内近岸区域呈现比其他海域近岸有较大的数密度分布, 而且与其他海域相比较, 渤海湾的气溶胶粒子数密度呈现较大值。站位 BF1 和 H01 处, 范围  $0.15 \mu\text{m} \leq r \leq 0.153 \mu\text{m}$  的粒子数密度接近于  $10^5 \text{cm}^{-3}$ , 比其他站位此范围内的粒子数密度大的多, 说明在这两个站位出现异常天气或异常气流。由这两个站位的地理位置, 不难发现, 二者都处于近岸位置, 但为何出现异常, 目前还不清楚。根据数密度分布图和风向的分布图显示, 来自海上的各个风向交汇的区域比其周围海域数密度呈现较小的值, 例如在站位 B28, 来自山东半岛北侧和辽东半岛东侧的风在此处汇集。然而来自大陆的风和来自海上风向交汇的区域, 气溶胶数密度却呈现较大的值, 例如站位 H01 处, 它是来自安徽省陆地的风与来自黄海海域的风, 交汇线上的一个站位, 其数密度值呈现较大值。而且, 在各个风向交汇的海域, 数密度值呈现一个阶梯梯度。图 4-3 中比较明显的梯度是位于渤海湾内处, 该海域正好是各个方向的风汇地, 在湾内形成一个碰撞风峰。由于湾内风无法向更广阔的海域扩散, 使得海表面上空的气溶胶粒子囤积。得不到扩散, 气溶胶粒子得以长时间滞留, 同时, 该海域受人类活动影响较大, 来自大陆的风携带了大量的人为源气溶胶粒子, 增加了该海域的气溶胶数密度值。

根据图 4-3 和表 4-1, 可以发现雾霾天气也是影响气溶胶粒子数密度的重要因素之一。从站位 B41 到站位 B65 三天的时间里, 都出现大大小小的雾霾情况, 其气溶胶数密度值相对比较大, 之后的站位 BF2、B70、B71 这三个站位同样出现在渤海湾内, 也是近海岸, 然而其数密度值明显比前几个站位的数密度值小很多。需要指出的是, 在我们到达站 B65 时出现了强雾霾天气, 之后两天出现强降雨情况, 对大气气溶胶有很强的冲刷、清洗作用, 当到达 BF2、B70、B71 时观测到的气溶胶粒子数据已经是被雨水清洗之后的数据, 其数密度值自然比之前站位小的多。

根据观测数据, 黄海海面上空比渤海海面上空的相对湿度大, 然而, 气溶胶数密度值却是后者比前者大的多。通过某些站点数据, 不难发现即使站点处的相对湿度值比较大, 也不能确保其位置的大气气溶胶粒子数密度值出现较大值。相对湿度比较大的黄海海表面的大气气溶胶粒子数密度要比渤海海表面气溶胶粒子数密度小的多。由于行程的原因, 我们没有到达长江三角洲的位置, 没有得到

相应的数据。

根据图 4-3 还发现在站位 B13 和站位 H01 处, 分别有一个小峰值。到达 B13 站位的时间是 11 月 22 日早上 7 点 50 分左右, 由于当时有雾气的出现, 导致气溶胶粒子数目相对的增加。B13 与 B14 的天气状况类似, 但是 B14 站位的气溶胶粒子数相对的比较少的原因是, 仪器的位置正好避开了风向。到达 H01 站位的时间是 12 月 03 日下午 5 点:30 分左右, 风向是来自陆地和海洋风向的交汇, 当日天气呈现多云的状况, 并且相对湿度有所升高, 到达 71%左右, 在进行数据采集时发现粒子数有较大的增加。

由此我们得出结论, 在近岸海域, 人为因素和雾霾天气是影响大气气溶胶粒子数密度出现大值的重要因素, 而相对湿度是相对影响比较小的因子, 是一个辅佐影响因子。

#### 4.1.3 气溶胶粒子半径 $1.0\mu\text{m}<r\leq 2.0\mu\text{m}$

下面分析尺度在  $1.0\mu\text{m}<r\leq 2.0\mu\text{m}$  范围内的气溶胶粒子数密度在黄渤海海域的分布情况。选择几个比较典型尺度的粒子数密度, 其分布情况如图 4-4 所示。可以看出, 在  $1.0\mu\text{m}<r\leq 2.0\mu\text{m}$  范围内, 渤海湾的气溶胶粒子数密度仍有相当大的比例, 但是随着远离近岸距离的增加, 在远海地区也逐渐出现了相当比例的气溶胶粒子, 当然, 距离海岸越远的海域气溶胶粒子数密度也会越小。

根据各站位的风速、风向信息图 4-2 和各尺度的气溶胶粒子数密度图 4-4, 不难观察到在远离近岸的海域, 风源附近容易出现尺度在  $1.0\mu\text{m}<r\leq 2.0\mu\text{m}$  范围的气溶胶粒子, 例如渤海湾的诸多站位以及在东海海域的 H22、H23、H24 等站位。同时, 在远离近岸的较远海域, 风速由小变大的海面附近, 也会有尺度为  $1.0\mu\text{m}<r\leq 2.0\mu\text{m}$  范围的气溶胶粒子产生, 例如 B02、B13、B14、H01、H10、H25 等站位。此范围内气溶胶粒子的产生, 既有来自大陆气溶胶粒子的影响, 也有由于风的作用而生成的新气溶胶粒子。然而, 由于风产生于海洋内部动力, 吹向于海面的各个方向, 特别是在黄海远海海域, 来自大陆的季风有很大部分被改变风向, 无法到达该海域, 所以大陆季风带来的气溶胶粒子很少被输送到该海域。因此, 我们推测出该海域出现的尺度为  $1.0\mu\text{m}<r\leq 2.0\mu\text{m}$  的气溶胶粒子有相当数量的粒子是由于海-气交换等过程产生海盐气溶胶粒子。

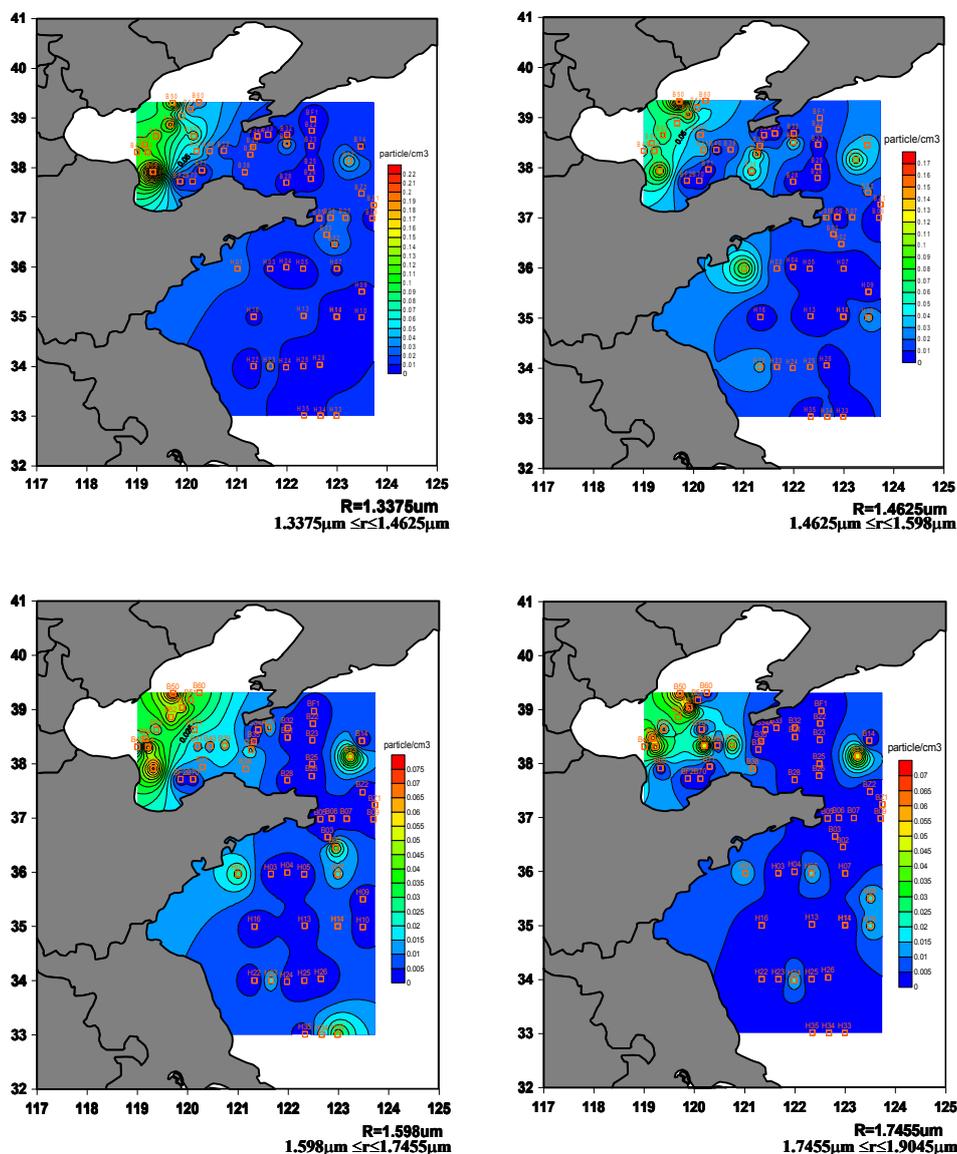


图 4-4 半径  $1.0\mu\text{m} < r \leq 2.0\mu\text{m}$  范围的气溶胶粒子数密度黄渤海海域的分布情况

#### 4.1.4 气溶胶粒子半径 $2.0\mu\text{m} < r \leq 5.0\mu\text{m}$

图 4-5 显示了半径为  $2.0\mu\text{m} < r \leq 5.0\mu\text{m}$  范围的气溶胶粒子数密度在渤海和黄海海域的分布情况。从图 4-5 可以看到，粒度为  $2.0\mu\text{m} < r \leq 5.0\mu\text{m}$  的气溶胶粒子随着尺度的增大，近岸处此范围内的粒子越来越少，但是在远海处持续出现。当粒子半径尺度大于  $3.0\mu\text{m}$  时，基本不会在近岸出现。而且，根据表 4-1 的天气记录情况，发现出现大粒子的这些站位，例如 B09、BZ1、H01、H03、H05、H07、H23、H24、H25 等站位，它们所处海域的风速都在  $6.0\text{m/s}$  以上。虽然 B14 当时的记录

风速没有达到 6.0m/s，但在采集数据完两个小时之后，风速却达到 9.0 m/s。

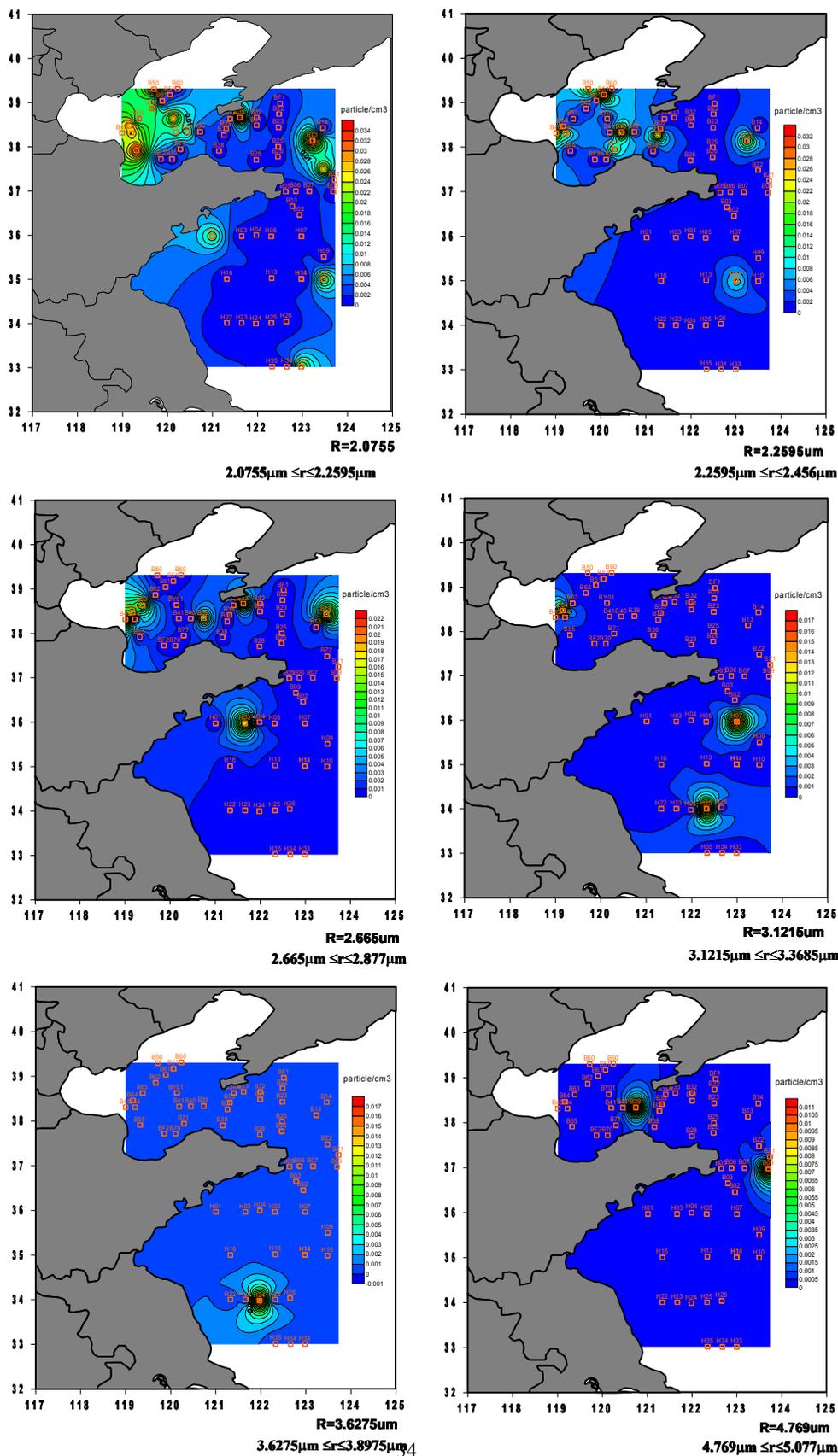


图 4-5 半径  $2.0\mu\text{m}<r\leq 5.0\mu\text{m}$  范围的气溶胶粒子数密度黄渤海海域的分布情况

观察图 4-5 发现, 在远离近岸的黄渤海海表面, 尺度在  $2.0\mu\text{m}<r\leq 5.0\mu\text{m}$  范围的气溶胶粒子的主要影响因子是风速, 因为大风速使海面上的浪花破碎产生飞沫, 形成尺度比较大的海盐气溶胶粒子。进一步印证了两个方面的内容: 一是在没有沙尘暴的影响下, 远海海表面处半径为  $2.0\mu\text{m}-5.0\mu\text{m}$  的气溶胶很可能是海盐气溶胶, 二是海表面风的作用有助于海盐气溶胶的产生。

根据仪器 LAP321 测量的黄渤海海表面气溶胶粒子数密度进行以上分析, 我们得到以下的结论:

(1) 受人类活动影响严重的近岸海域, 气溶胶数密度值比较大, 气溶胶粒子的尺度范围为  $0.15\mu\text{m}<r\leq 1.0\mu\text{m}$ 。在该海域, 除了沙尘暴等恶劣自然现象的影响之外, 人为活动和雾霾天气是影响气溶胶数密度值增大的主要因素, 而相对湿度对气溶胶数密度的影响较小。

(2) 半径在  $0.15\mu\text{m}<r\leq 1.0\mu\text{m}$  内气溶胶粒子数密度, 渤海海域上空气溶胶数密度值比黄海海域气溶胶粒子数密度值要大, 进一步说明, 渤海湾海域更容易受人类活动的影响。

(3) 尺度为  $1.0\mu\text{m}<r\leq 2.0\mu\text{m}$  范围的气溶胶粒子距离海岸较远些, 受人类活动影响较小, 主要出现在风源附近, 以及风速由小变大的海域附近, 大部分粒子是由海-气交换等过程产生的较小尺度的海盐气溶胶。

(4) 尺度在  $2.0\mu\text{m}<r\leq 5.0\mu\text{m}$  范围的气溶胶粒子, 分布在远海海域, 主要影响因素是风速, 是由于大风速使海表面上的浪花破碎产生飞沫, 而形成尺度较大的海盐气溶胶粒子。

## 4.2 北京市大气气溶胶粒子体积谱特性分析

气溶胶的体积谱是表征气溶胶特性的一个物理参数, 指单位体积空气中所含一定尺度范围内气溶胶颗粒的体积浓度 ( $\mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ), 与大气颗粒物的质量浓度谱有类似的结构形态, 一定程度上反映大气质量浓度谱的变化。北京市既受亚洲大陆的季风气候影响, 又受当地环境污染的作用。研究北京市气溶胶体积谱的特征

在一定程度上既能反映亚洲气候变化对城市气溶胶影响的特点,又能反映当地环境的污染状况。探究北京市气溶胶粒子体积谱特征,可以分析北京市大气颗粒物的来源和气溶胶发生源结构<sup>[57]</sup>,不同城市气溶胶体积谱有不同的特点,同一城市不同时期的体积谱也会有不同的变化。

本论文利用 AERONET 资料分析北京市 2001-2011 年间气溶胶体积谱的四季特征,并分析了体积谱与光学厚度、Ångström 波长指数、单次散射率等的关系,得到了北京市气溶胶物理特性。

#### 4.2.1 数据来源

AERONET(Aerosol Robotic Network)是一个地基气溶胶检测网,由 NASA 和 PHOTONS 建立,该网站提供的气溶胶信息包括两个方面,一是直接太阳辐射消光信息,一个是天空辐射度的天顶角分布数据。AERONET 提供全球的气溶胶光学厚度、谱分布、折射率指数、单次散射反照率、相函数等气溶胶参数的分布<sup>[39]</sup>。

气溶胶粒度分布、复折射率、单次散射反照率和相函数等需要通过一定的反演算法得到。AERONET使用了Dubovik和King的算法<sup>[58]</sup>反演气溶胶各个参数的模式,通过观测得到的天空散射数据来进行反演以获得气溶胶物理光学性质。AERONET的复折射指数产品<sup>[59]</sup>包括400、676、870和1020nm四个波段,气溶胶粒子谱产品粒子半径在0.06 $\mu\text{m}$ -15 $\mu\text{m}$ 之间,对数等间隔分布的22个离散的粒子半径的体积谱分布。

根据 AERONET 网站提供的北京市 2011 年 11 月 26 日的日平均气溶胶粒子体积谱数据,得到如下图 4-6 所示的结果。

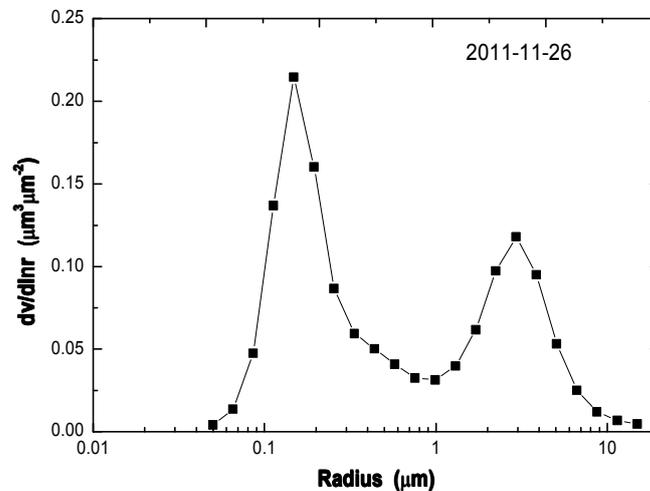


图 4-6 AERONET 观测的北京市气溶胶粒子体积谱

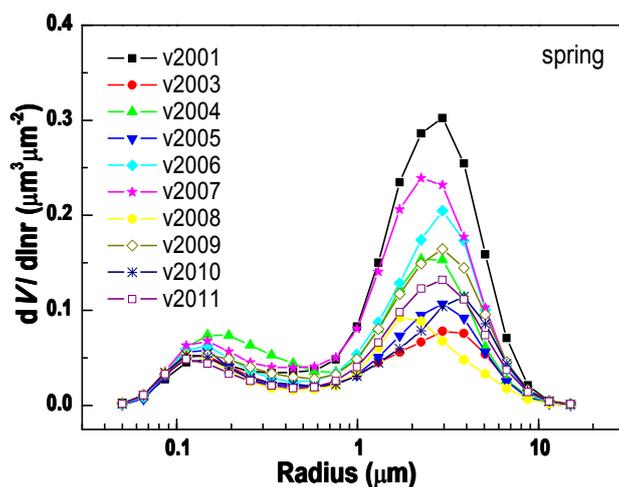
气溶胶粒子体积谱存在两个峰值，可以用双峰的正态函数来表示，相关系数约为 0.95。

$$dv = 0.02197 + \frac{0.06685}{\sqrt{2\pi} \times 0.28617} e^{-\frac{(\log r - 0.15719)^2}{2 \times 0.28617^2}} + \frac{0.04025}{\sqrt{2\pi} \times 0.3361} e^{-\frac{(\log r - 2.8442)^2}{2 \times 0.3361^2}} \quad (4-1)$$

第一个峰值半径  $r=0.15719\mu\text{m}$ ，宽度大约为  $0.28617\mu\text{m}$ ，第二个峰值半径  $r=2.8442\mu\text{m}$ ，宽度大约为  $0.3361$ 。

#### 4.2.2 北京市气溶胶体积谱季节分布

图 4-7 给出了 2001-2011 年间部分月份北京市平均气溶胶体积谱的情况。从图 4-7 可以看出：在春季，大部分年份的气溶胶体积谱是以粗模态粒子占主导的，主要原因是，在春季总有几个气旋经过戈壁沙漠-塔克拉玛沙漠，随着西北风，将大量沙尘气溶胶输送到我国境内<sup>[60]</sup>，其中在 2001 年 4 月份就有一次规模比较大的沙尘暴事件。在夏季，细模态粒子占主导地位，由于高温条件下大气化学反应加快，有利于超细和细粒子（半径约为  $0.09 < r < 0.2\mu\text{m}$ ）的生成<sup>[61]</sup>，从而气溶胶细粒子浓度增加；同时受季风影响，多吹东南风，北京市相对湿度增加，而随着相对湿度的增加，半径大于  $0.1\mu\text{m}$  的粒子浓度也增加。秋季和冬季气溶胶体积谱形态进一步说明，沙尘是影响我国境内城市地区气溶胶粗模态粒子异常增长的主要气象因素。



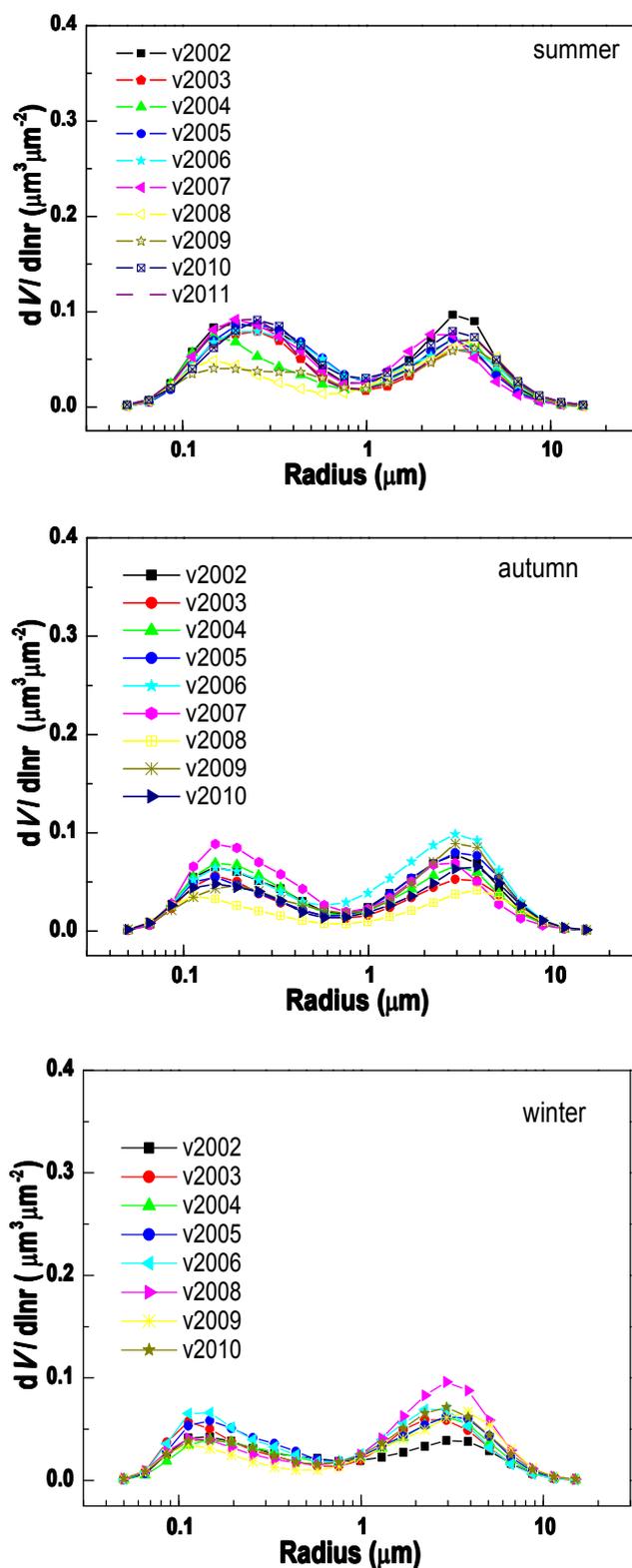


图 4-7 北京市不同季节的气溶胶粒子体积谱

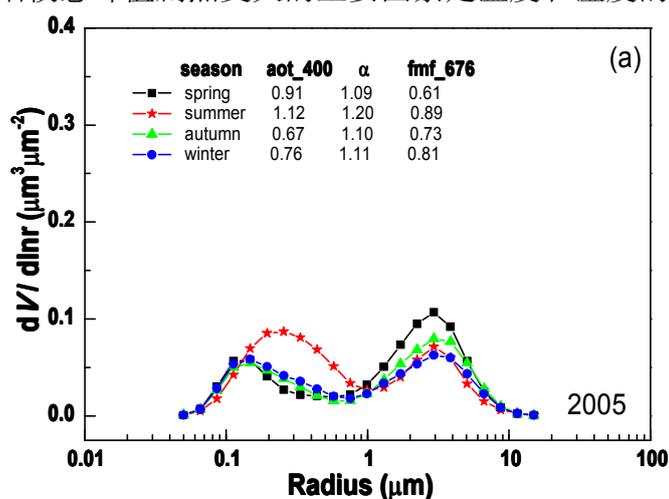
#### 4. 2. 3 体积谱形态与光学厚度、Ångström 指数及小颗粒比例关系

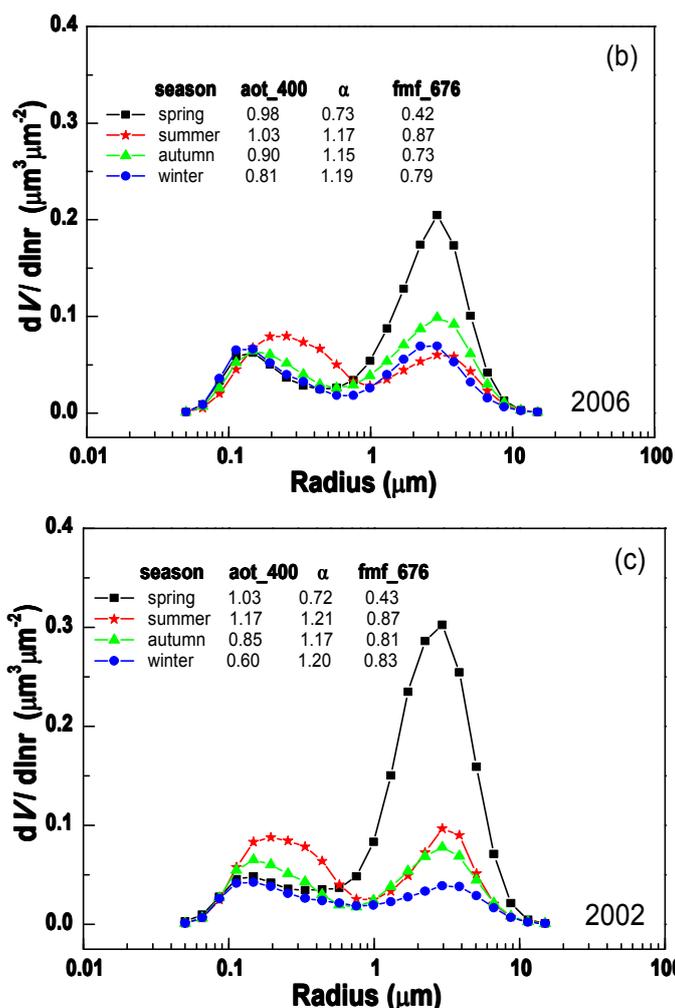
本论文采用波长 $\lambda=400\text{nm}$ 处的气溶胶光学厚度值 AOT<sub>400</sub>。小颗粒比例 FMF<sub>676</sub> 是波长 $\lambda=676\text{nm}$ 处小颗粒气溶胶光学厚度值与总气溶胶光学厚度值的

比。波长与粒子尺度相类似时，散射光最有效，波长大于粒子尺度很多时，散射效果最差。取Ångström 波长指数 $\alpha=0.75$ 来区分细模态和粗模态粒子占主导作用的气溶胶模式，此时  $FMF_{676} \approx 50\%$ 。之所以选择 676nm 波长处的 FMF，是因为这个波段为短波太阳光谱的中心波长，能量在 50%左右<sup>[62]</sup>。

在图 4-8 中，(a)(b)(c)分别是 2005、2006、2002 年对应的季节性体积谱形态，并根据 AERONET 网站提供的月平均数据 AOT<sub>400</sub>、Ångström 波长指数 $\alpha$ ，求平均得到的季平均数据。体积谱的最大峰值出现在春季，其次是夏季，秋冬季节的体积谱形态较相似，而我们发现夏季的光学厚度是最大的，说明出现最大体积谱峰值的季节并不是光学厚度最大的季节。同时，细模态结构中，夏季体积谱峰值半径比春秋冬季节的峰值半径向较大值偏移，这是由于高温和高湿度的情况下，新的较大粒子的形成；相对的粗模态的峰值半径在各个季节是相似的，差别不大，只有峰值大小的差异。图 4-8(a)中，光学厚度最大的体积谱峰值半径  $r \approx 0.25 \mu\text{m}$ ， $\alpha \approx 1.2$ ， $FMF_{676} \approx 89\%$ ，说明此形态下的环境中细粒子气溶胶占绝大部分，图 4-8(b)和(c)中，最大体积谱峰值半径  $r_{Vmax} \approx 3 \mu\text{m}$ ， $\alpha \approx 0.72$ ， $FMF_{676} \approx 42\%$ ，说明此体积谱形态下的环境中粗模态粒子比重很大。

从图 4-8 中的三个图中不难发现，秋冬季节的体积谱粗细模态的最大峰值都在 0.05 附近，细模态的峰值半径  $r \approx 0.15 \mu\text{m}$ ，粗模态的峰值半径  $r \approx 3 \mu\text{m}$ 。综上所述我们可以得到，影响北京市气溶胶体积谱粗模态峰值剧烈变大的主要因素是沙尘的大量增加，影响细模态峰值剧烈变大的主要因素是温度和湿度的大幅度增高。

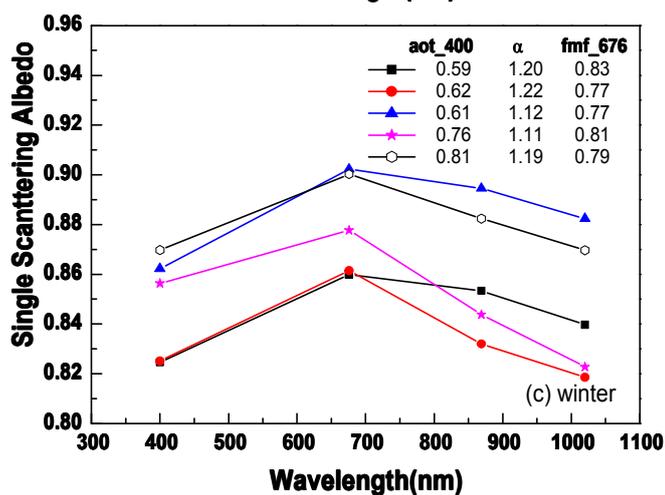
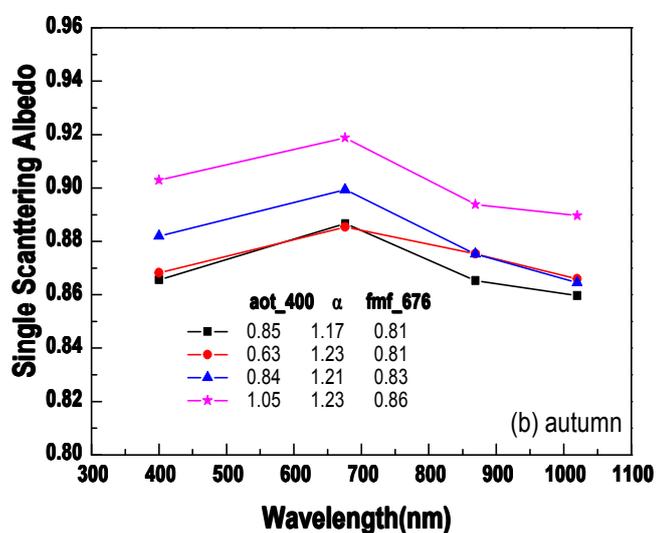
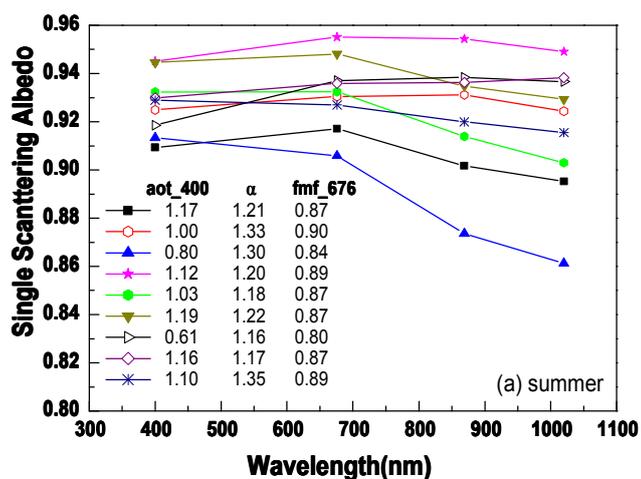


图 4-8 气溶胶粒子体积谱与 AOT\_400、 $\alpha$  及 FMF\_676 的关系

#### 4.2.4 气溶胶粒子大小与单次散射反照率 $\omega_0$ 的关系分析

图 4-9 是不同季节对应不同粒子尺度下的  $\omega_0$  变化情况。当 FMF\_676 > 75% 时，即细模态粒子占主导作用的情况下，随着波长的增长， $\omega_0$  越小(如图 4-9 所示)，说明粒子的散射效果越来越弱，由波长与粒子尺度相类似时，散射光最有效，波长大于粒子尺度很多时，散射效果最差，由此可知，此状况是细粒子占主导成分的气溶胶粒子。夏季的气溶胶多是黑炭和煤烟凝结物含量比较低的水溶性气溶胶，它随着相对湿度的增大而增加，同时导致细模态粒子的增长和光散射系数增长，如图 4-9(a) 所示， $\omega_0$  取最大值时，波长  $\lambda \approx 676\text{nm}$ 。但是当 FMF\_676 < 75% 时，随着波长的增长， $\omega_0$  有的增大，有的减小，如图 4-9(d) 所示， $\omega_0$  取最大值时，波长  $\lambda > 676\text{nm}$ 。 $\omega_0$  随波长的增大而增大，是因为粗模态粒子占的比重比较大，散射消光作用较强； $\omega_0$  随着波长的增大而减小，可能是大气中含有大量的吸收性粒子，气溶胶中黑炭和煤烟凝结物较多时在可见光范围

内吸收性较大<sup>[63]</sup>。



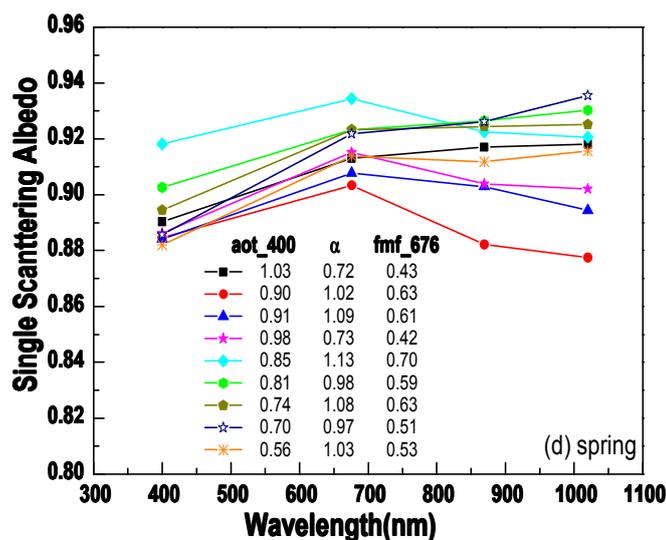


图 4-9 不同粒子尺度的单次散射反照率

通过分析北京市气溶胶体积谱的季节性分布特征,气溶胶体积谱形态与气溶胶光学厚度 AOT、Ångström 波长指数及 FMF\_676 的关系,气溶胶粒子大小与单次散射反照率 $\omega_0$ 的关系,得到以下结论:

(1) 北京市春季的气溶胶体积谱最大峰值出现在粗模态( $r_{Vmax} \approx 3 \mu\text{m}$ ),主要影响因素是沙尘;夏季的最大峰值一般出现在细模态( $r_{Vmax} \approx 0.25 \mu\text{m}$ ),主要影响因素是温度和湿度;秋冬季节的粗模态和细模态的峰值比较类似,细模态的峰值半径相对夏季向粒子小的方向偏移,粗模态峰值半径与其他季节相似。

(2) 夏季的 AOT 最大, FMF\_676 > 80%, 细模态粒子占主要成分, AOT\_400 的值最大;春季的 AOT 与夏季稍小, FMF\_676 < 75%, 粗模态粒子成分明显增多, AOT\_400 的值也比较大;秋冬季节的 AOT 比夏季小的多, 75% < FMF\_676 < 85%。

(3) 通常情况,当 FMF\_676 > 75% 时,  $\omega_0$  随波长的增大而减小,  $\omega_0$  出现最大值时, 波长  $\lambda \approx 676 \text{nm}$ ; 当 FMF\_676 < 75% 时,  $\omega_0$  随波长的增大而增大,  $\omega_0$  出现最大值时, 波长  $\lambda > 676 \text{nm}$ 。若出现相反的状况,则很可能是当地区域吸收性气溶胶的数量增多,如黑炭气溶胶和煤烟气溶胶等。

### 4.3 利用 CALIPSO 卫星观测黄渤海海域上空气溶胶垂直分布

#### 4.3.1 CALIPSO 数据简介

CALIPSO 是一个云-气溶胶雷达和红外探测卫星,在它运行的这几年,已经获得了一整套关于气溶胶直接强迫估计的观测结果。该卫星轨道周期为 16 天。CALIPSO 卫星装载着一个具有正交偏振探测能力的云-气溶胶激光雷达

CALIOP, 可以提供 532nm 和 1064nm 两个波段在其运行轨道上对地面方向的总的后向散射垂直廓线, 还可以提供 532nm 波段的去偏振垂直廓线<sup>[28]</sup>。目标后向散射去偏振的定义为: 垂直与平行的后向散射系数的比值。CALIPSO 观测的数据产品, 由美国航空航天局(NASA)的兰利研究中心(Langley Research Center, LaRC)大气科学数据中心处理、存储和发布。数据的主要格式是 HDF 格式, 主要有 L0-L4 个级别, 常用的是 L1 和 L2 两级的数据。L1 数据产品中, CALIOP 提供了 532nm 的垂直和平行通道, 以及 1064nm 的红外通道的衰减后向散射强度信息等, IIR 提供红外辐射参数, WFC 提供辐射和反射比参数。L2 数据产品中, 主要是云和气溶胶两种产品, 对于云产品有三种水平分辨率: 333m、1km、5km, 主要有在 532nm 通道的总后向散射系数和消光系数、云层标识、垂直去偏振比等参数。对于气溶胶只有 5km 分辨率的产品, 主要有表面风速、气溶胶层的顶部、底部高度、气溶胶层数信息、积分衰减总色比、穿透标识(opacity flag)等。

#### 4.3.2 区分云和气溶胶的算法

Lever1 数据中衰减后向散射系数  $\beta'_\lambda(r)$  可用下面的公式来表示:

$$\beta'_\lambda(r) = \frac{r^2 P_\lambda(r)}{C_\lambda} = (\beta_{\lambda,m}(r) + \beta_{\lambda,p}(r)) T_{\lambda,m}^2(r) T_{\lambda,o_3}^2(r) T_{\lambda,p}^2(r) \quad (4-2)$$

式中,  $C_\lambda$  为激光雷达系统校准常量。  $P_\lambda(r)$ : 背景的原始数据。  $\beta(r)$ : 后向散射系数。  $T_{\lambda,m}^2(r)$ 、  $T_{\lambda,o_3}^2(r)$ 、  $T_{\lambda,p}^2(r)$ : 由分子、臭氧、颗粒物引起的双向散射透过率。这里的颗粒指的是云或气溶胶粒子。其中双向透过率为:

$$T_x^2(r) = \exp(-2\tau_x(r)) = \exp(-2 \int_0^r \sigma_x(r') dr') \quad (4-3)$$

其中,  $\tau_x$ : 光学厚度;  $\sigma_x$ : 大气柱的消光系数。

而衰减后向散射比  $\chi'$  可以用以下公式求的:

$$\chi' = \beta'_{1064} / \beta'_{532} \quad (4-4)$$

Mark A.等人<sup>[64-66]</sup>提出了云、气溶胶层光学特性的算法, 从而根据衰减后向散射强度、各散射比等建立函数关系, 分辨出云或气溶胶等参数, 通过 CAD(Cloud Aerosol Discrimination)算法来确定云和气溶胶层, 然后再利用 SCA(Scene Classification Algorithms)算法来计算云雷达比、云冰-水相或气溶胶雷达比。根据

衰减色比和在 532nm 通道的衰减散射系数，来区分气溶胶和云的类型，如表 4-2 所示。

表 4-2 不同气溶胶类型下，对应的衰减后向散射系数和衰减后向散射比

	Desert	Cirrus	Cumulus/Stratus /high Fog	Maritime (RH: 90%)	Maritime/Arctic/Antarctic/ Urban /Continental
Color ratio 1064nm/532nm	1.17-1.2	0.6-1.7	0.9-1.1	0.6-0.75	0.35-0.55
Backscatter coefficient at 532nm	0.009-0.01	0.01-1	0.03-10	0.001-0.008	0.00004-0.01

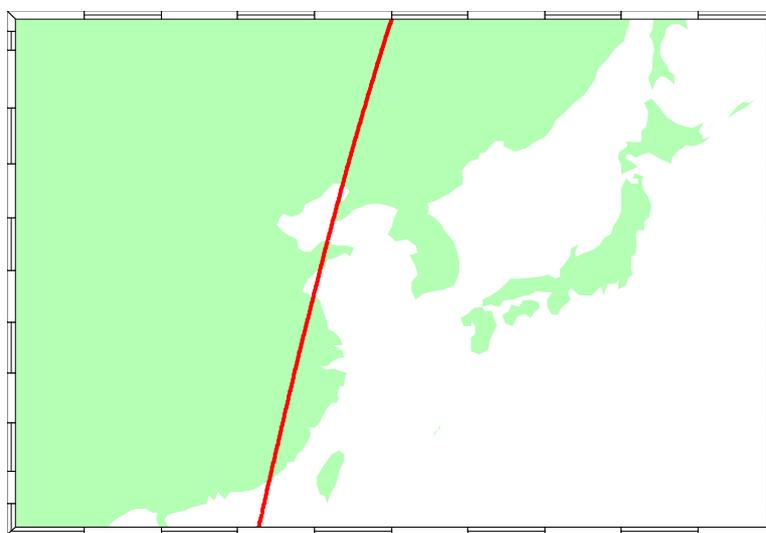


图 4-10 2006 年 10 月 12 日 17:52:12-18:38:28 的 CALIPSO 卫星轨迹图

图 4-10 显示了 CALIPSO 卫星于 2006 年 10 月 12 日 17:52:12-18:38:28 之间段的运行轨迹，该轨迹穿过黄渤海海域，针对该海域的卫星数据得到 532nm 的总衰减后向散射强度的分布情况，如图 4-11，和衰减色比图 4-12。

图 4-11 和图 4-12 的经纬度范围为(20°N, 116°E)-(50°N, 125°E)。根据表格 4-2 所示的数据来分析图 4-11 和图 4-12，比较清晰地看到大气层垂直方向上云和气溶胶的分布情况，卷云一般分布在距离地表 5km 以上的高空，同时我们可以看到，对于比较厚的云，激光信号无法穿透。而气溶胶层基本分布在距离地表 8km 以下的大气空间内，并且主要在距离地表 2km 以下的位置。在地表层附近，我们发现衰减散射系数比较大，接近于  $0.1 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ，但是衰减色比却为 0.2 左右，所以推测是地面受污染比较严重的小颗粒气溶胶层，或者是雾和雾霾天气。从图

4-11 和 4-12 中所显示的多层次透射云层和气溶胶层的结构，有利于我们观测大气垂直轮廓方向上气溶胶分布特点，同时有利于采用多个时间段的数据观测污染物的长距离传输，也可以验证和完善其他仪器的反演。衰减后向散射强度的分布图和衰减色比图，让我们更加直观的、清晰地观测到云、气溶胶的时空分布情况。

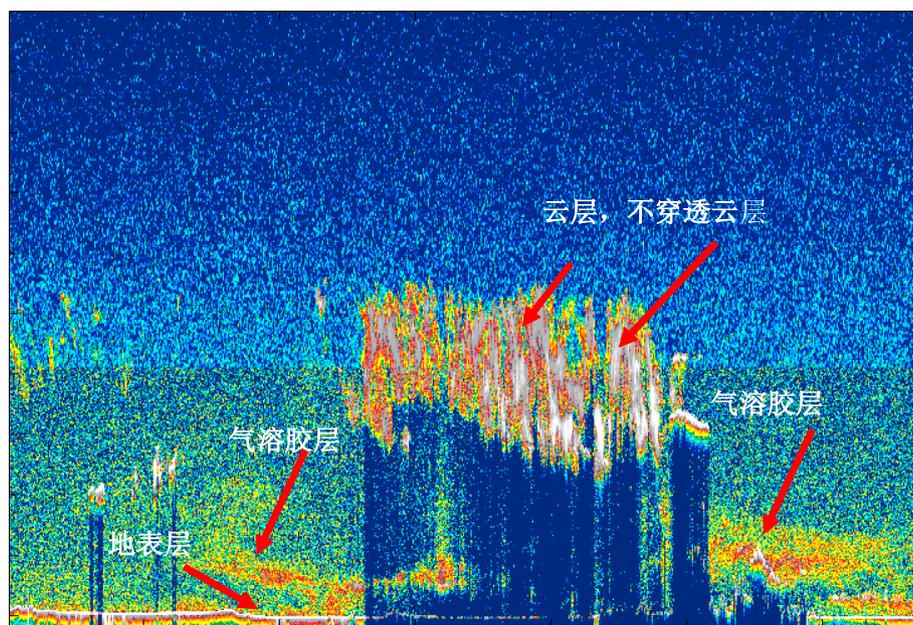


图 4-11 2006 年 10 月 12 日 17:52:12-18:38:28 的后向散射衰减强度分布

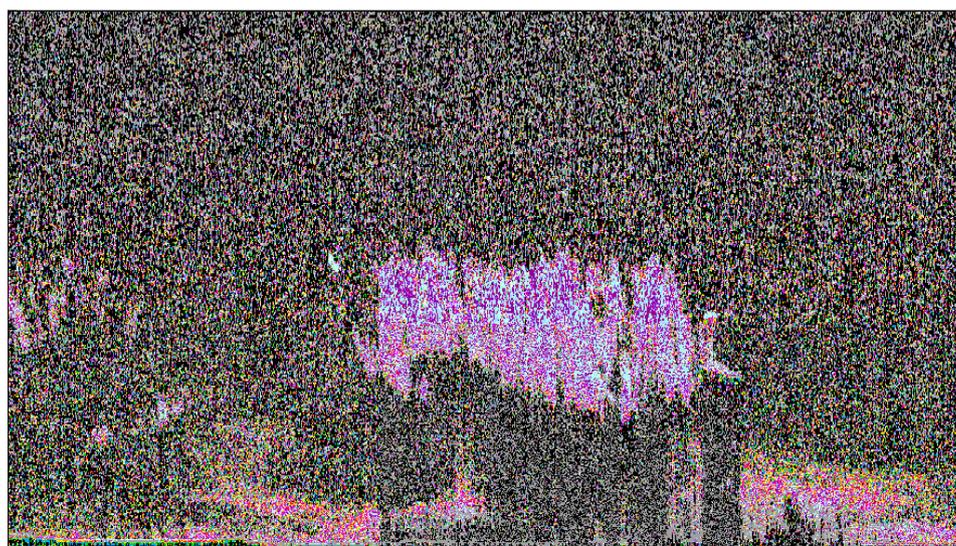


图 4-12 2006 年 10 月 12 日 17:52:12-18:38:28 的后向散射衰减色比分布

#### 4.3.3 中国近海地区垂直方向气溶胶分布情况

我们下载了 CALIPSO 卫星关于 2011 年 11 月 21、22、23、24、29、30 日，这几天的 L1 数据，经处理得到衰减后向散射强度和后向散射衰减色比图。

图 4-13 显示了 CALIPSO 卫星在 2011 年 11 月 21 日 04:21:19 至 05:13:58 这个时间段的轨迹，箭头方向表示卫星运动方向，此时我们的航船所处位置如图中红色星号所示。我们发现在约  $46^{\circ}\text{N}$ ，高度约为 6km 处，衰减后向散射系数  $\beta'_{532} \approx 0.6 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ，散射色比  $\chi' \approx 1.1$ ，即为卷云；在约  $20^{\circ}\text{N}$ - $40^{\circ}\text{N}$ ，高度约为 1.5km 处， $\beta'_{532} > 0.1 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ， $\chi' \approx 1$ ，即很可能是层云；在约  $29^{\circ}\text{N}$ - $41^{\circ}\text{N}$ ，渤海、黄海、东海海表面处， $\beta'_{532} \approx 0.03 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ， $\chi' > 0.6$  即很可能有雾存在。同时发现，在纬度为  $47^{\circ}\text{N}$ - $50^{\circ}\text{N}$  的范围，接近于地表的位置，色比  $\chi' < 0.2$ 。

图 4-14 显示了 CALIPSO 卫星在 2011 年 11 月 22 日 17:29:17-18:15:28 时间段内的运行轨迹，其运行方向如图中箭头所示，此刻科考船所在位置如红色星号所示，我们发现在纬度为  $32.24^{\circ}\text{N}$ - $26^{\circ}\text{N}$ ，从海表面至 1km 的高度附近， $\beta'_{532} \approx 0.006 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ， $\chi' \approx 0.5$ ，很可能有海上气溶胶的大量存在，出现雾的天气。在高度为 6km，纬度为  $44^{\circ}\text{N}$  处出现厚度约为 4km 的厚云层，阻碍了信号的穿透性，在高度为 10km，纬度为  $29^{\circ}\text{N}$  处，有卷云的存在。在纬度为  $47^{\circ}\text{N}$ - $50^{\circ}\text{N}$  的范围，接近于地表的位置，色比  $\chi' < 0.2$ 。

图 4-15 显示了 CALIPSO 卫星在 2011 年 11 月 23 日 04:08:43-05:01:02 时间段内的运行轨迹，其运行方向如箭头所示，此时间科考船的位置如图中红色星号所示。可以看到，在高空 12km 处有卷云存在，在高度为 2km 附近，有层云存在，同时，在地表附近，纬度为  $20^{\circ}\text{N}$ - $34^{\circ}\text{N}$  附近，也就是黄海和东海海面上，发现有薄薄的一层气溶胶层。在纬度为  $42^{\circ}\text{N}$ - $47^{\circ}\text{N}$  的范围，接近于地表的位置，色比  $\chi' < 0.6$ ，但是在纬度为  $47^{\circ}\text{N}$ - $50^{\circ}\text{N}$  的范围，接近于地表的位置，色比  $\chi' < 0.2$ 。

CAL\_ID\_L\_2.5kmAPro-Prov-V3-02.2011-11-21T04-21-22ZD.hdf

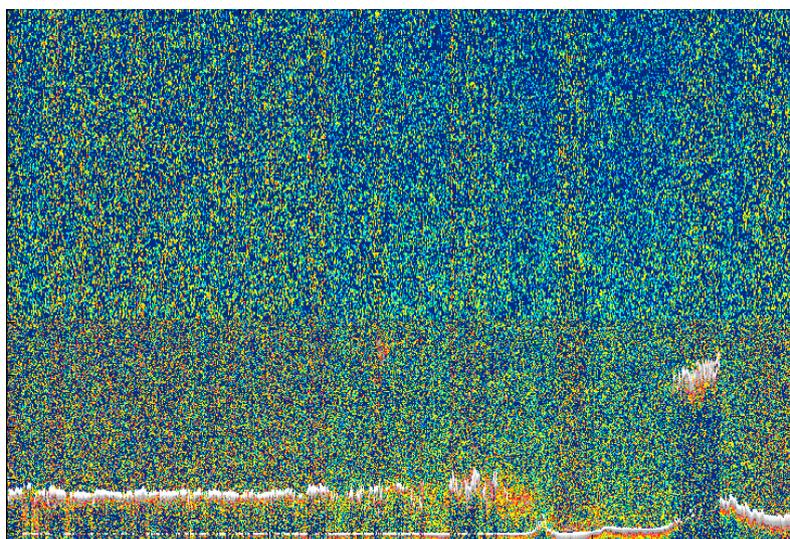
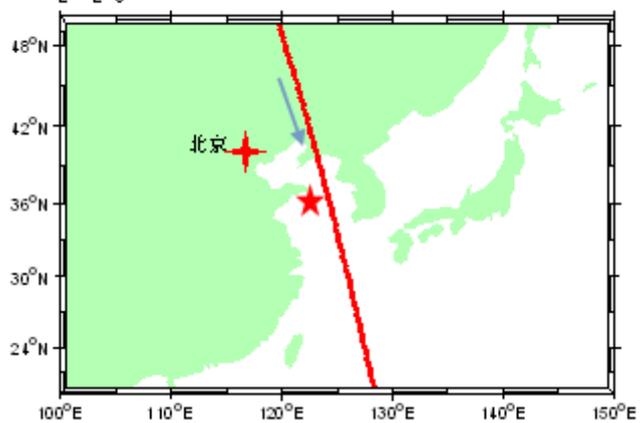


图 4-13 2011 年 11 月 21 日的 CALIPSO 卫星轨迹、衰减后向散射强度、后向散射衰减色比分布

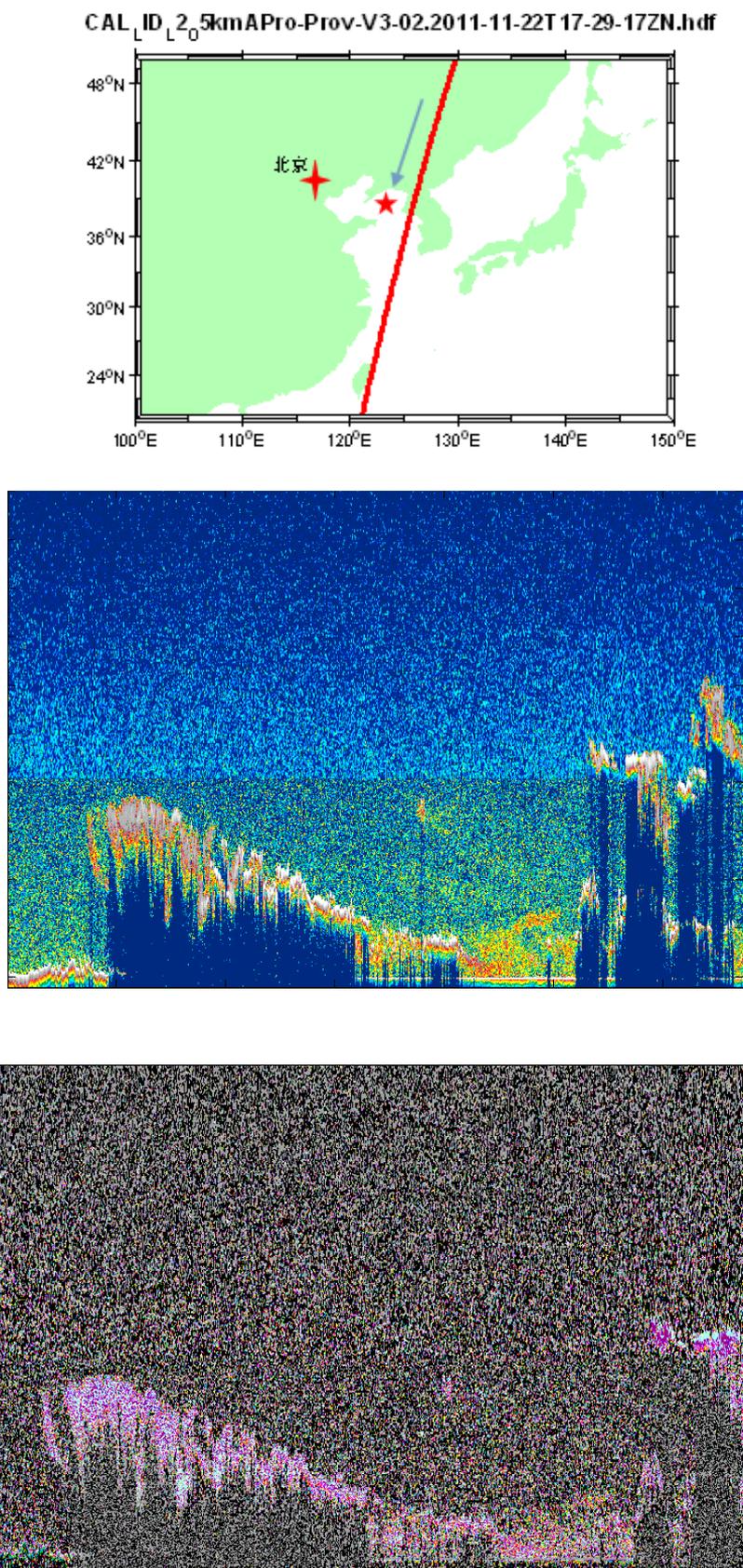


图 4-14 2011 年 11 月 22 日的 CALIPSO 卫星轨迹、衰减后向散射强度、后向散射衰减色比分布

CAL\_ID\_2\_5kmAPro-Prov-V3-02.2011-11-23T04-08-43ZD.hdf

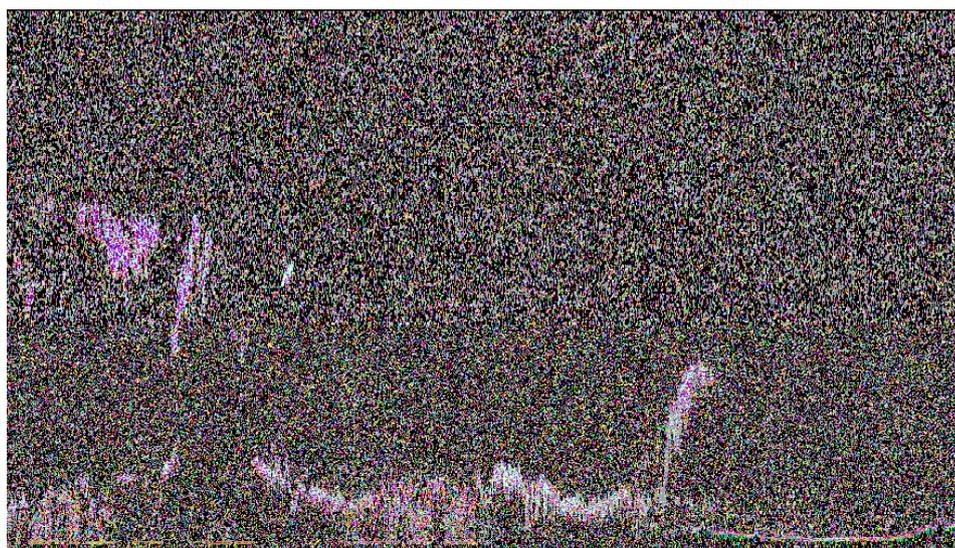
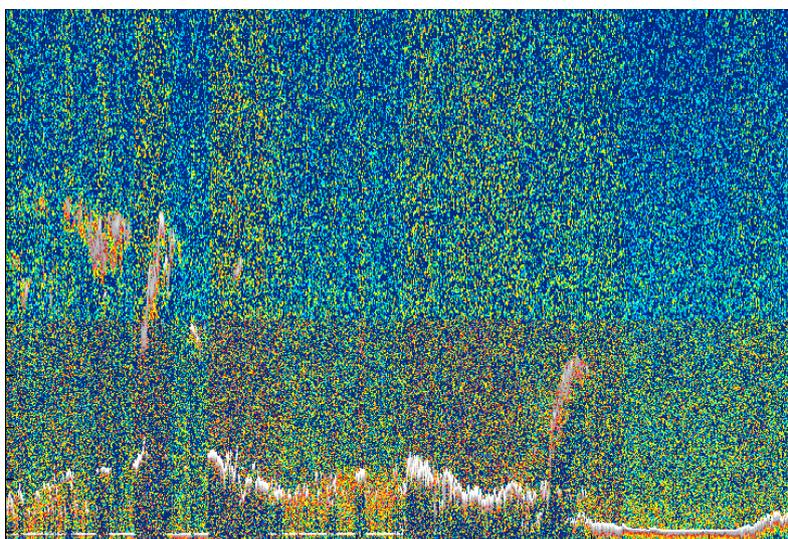
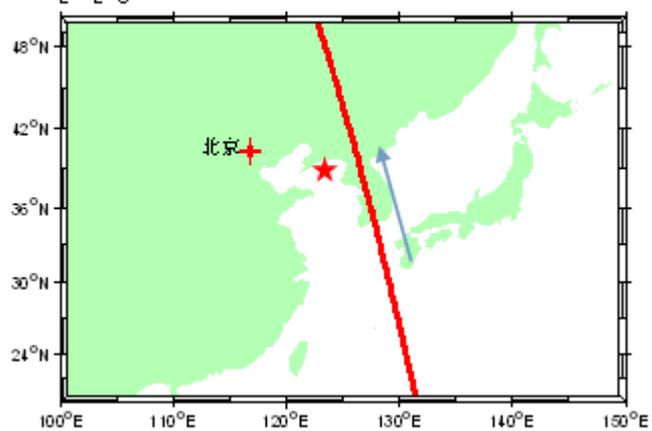


图 4-15 2011 年 11 月 23 日的 CALIPSO 卫星轨迹、衰减后向散射强度、后向散射衰减色比分布

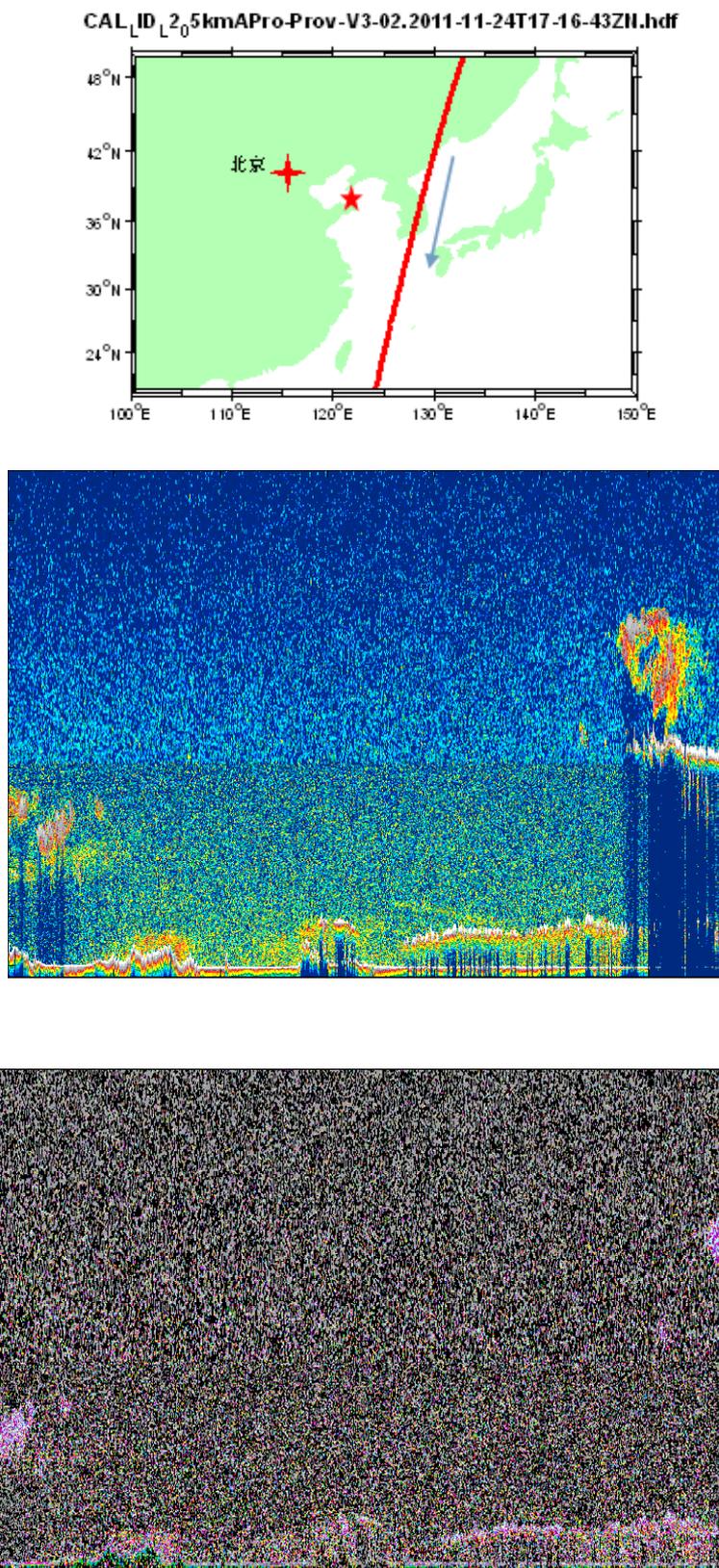


图 4-16 2011 年 11 月 24 日的 CALIPSO 卫星轨迹、衰减后向散射强度、后向散射衰减色比分布

CAL\_ID\_L\_2\_5kmAPro-Prov-V3-02.2011-11-29T17-35-18Z.hdf

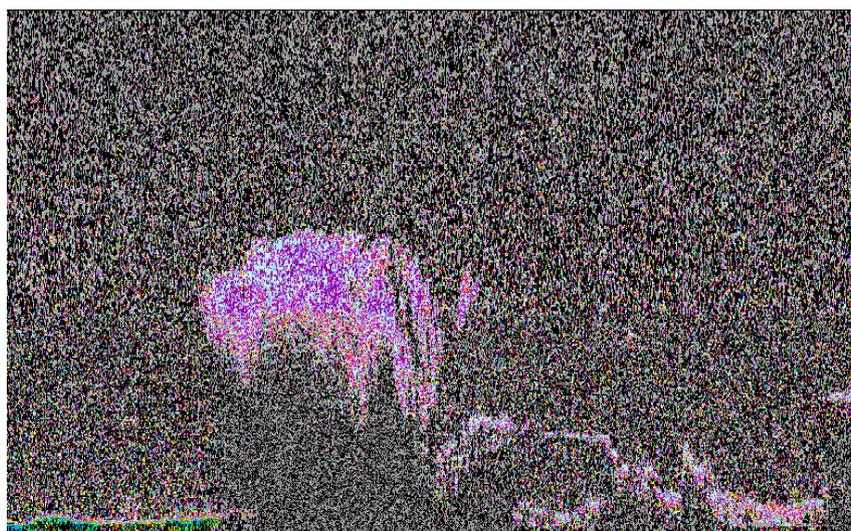
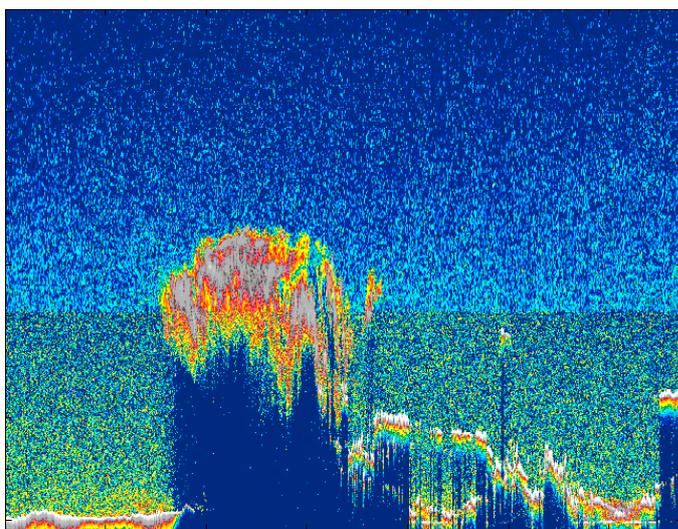
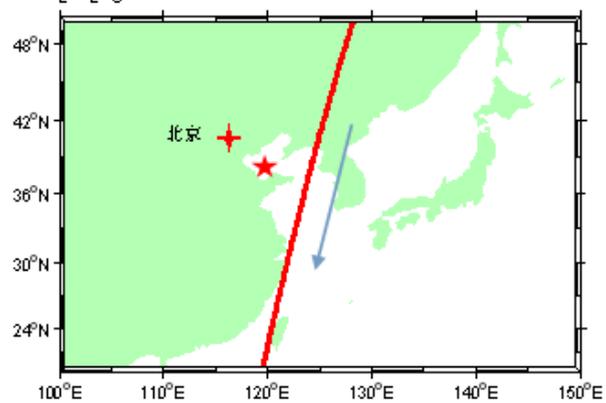


图 4-17 2011 年 11 月 29 日的 CALIPSO 卫星轨迹、衰减后向散射强度、后向散射衰减色比分布

CAL\_ID\_L0\_2.5kmAPro-Prov-V3-02.2011-11-30T04-14-49ZD.hdf

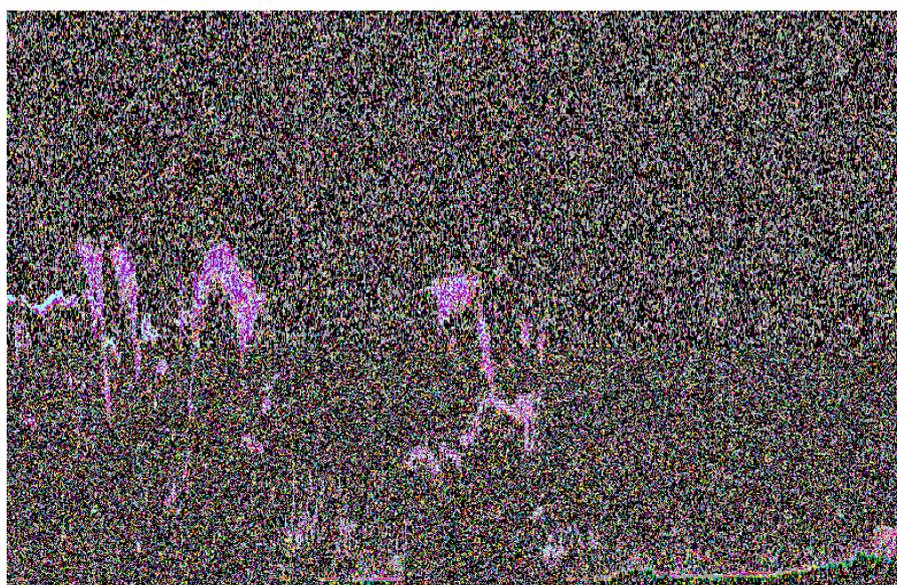
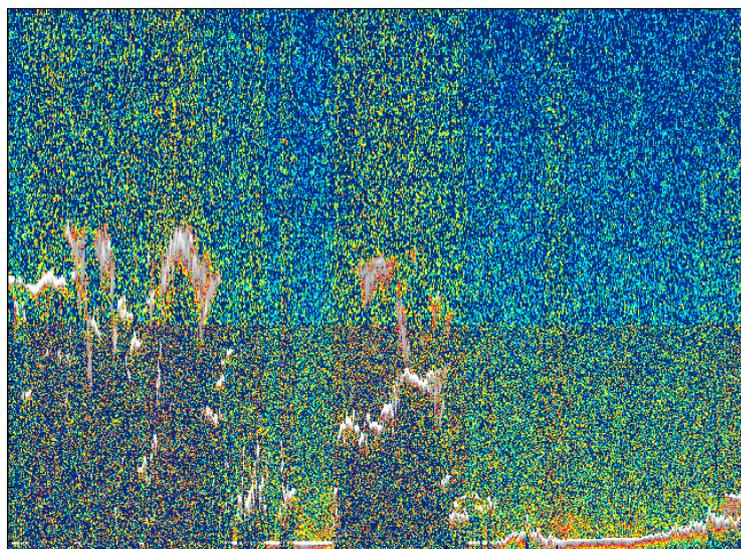
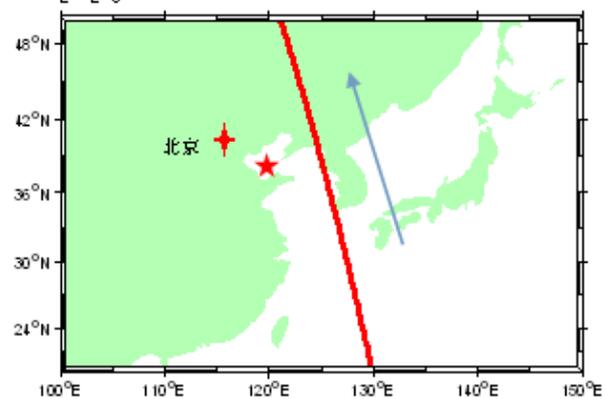


图 4-18 2011 年 11 月 30 日的 CALIPSO 卫星轨迹、衰减后向散射强度、后向散射衰减色比分布

图 4-16 显示了 CALIPSO 卫星在 2011 年 11 月 24 日 17:16:22-18:02:56 时间段内的轨迹, 其运行方向如箭头所示, 此时科考船所在的位置如图中红色星号所示。可以发现, 在纬度为  $35.22^{\circ}\text{N}$ - $29.29^{\circ}\text{N}$  的海表面处, 有一层薄薄的气溶胶层, 同时在其上方 2km 左右附近, 有层云存在。在  $35.22^{\circ}\text{N}$ - $38.19^{\circ}\text{N}$  附近, 正好跨过南朝鲜半岛, 在高度为 2km 的上空, 有一层类似于层云的物质, 但是现在无法确定其是层云还是人为因素引起的排放气溶胶。在纬度为  $47^{\circ}\text{N}$ - $50^{\circ}\text{N}$  的范围, 接近于地表的位置, 色比  $\chi' < 0.2$ 。

图 4-17 显示了 CALIPSO 卫星在 2011 年 11 月 29 日 17:35:12-18:21:27 时间段内的运行轨迹, 其运行方向如箭头所示, 此时科考船所在位置如图红色星号所示。可以发现, 在纬度为  $35.22^{\circ}\text{N}$ - $26.28^{\circ}\text{N}$  的附近, 有多层次结构存在, 说明大气层的相互作用比较强烈, 而且不像前几日, 在当日的海表面没有一层薄薄的气溶胶存在。在纬度为  $42^{\circ}\text{N}$ - $50^{\circ}\text{N}$  的范围, 接近于地表的位置, 色比  $\chi' < 0.2$ 。

图 4-18 显示了 CALIPSO 卫星在 2011 年 11 月 30 日 04:14:49-05:07:23 时间段内的轨迹, 其运行方向如箭头所示, 可以看到, 在纬度为  $20^{\circ}\text{N}$ - $40.86^{\circ}\text{N}$  的上空, 衰减后向散射强度出现星点状, 同时又多层和断层结构的状态, 说明当日天气状况不稳定。查看当日的气象数据, 发现确实出现较大风雨天气的情况。在纬度为  $42^{\circ}\text{N}$ - $50^{\circ}\text{N}$  的范围, 接近于地表的位置, 色比  $\chi' < 0.2$ 。

根据 CALIPSO 卫星的 L1 数据, 得到 2011 年 11 月 21、22、23、24、29、30 六天的衰减后向散射强度和色比, 得到以下结论:

(1) 通过衰减后向散射和后向散射色比数据, 能直观、清晰地观测到大气垂直结构上, 云和气溶胶的分布情况;

(2) 在没有不可穿透云影响的地区, 晴天的天气状况下, 通过衰减后向散射和后向散射色比图, 能有效分辨出陆地和海表面, 即通常情况下, 海表面上色比  $\chi' > 0.2$ , 陆地上色比  $\chi' < 0.2$ 。

(3) 通过衰减后向散射和后向散射色比数据, 能初步判断当日的天气状况, 如果衰减后向散射数据出现断层、多层、星点状, 说明当日天气很可能是雨天。

#### 4.4 本章小结

针对黄渤海海域上空大气气溶胶物理特性的研究,本章节主要是通过现场采集的实测数据,得到该海域气溶胶数密度的区域分布特征,并根据现场记录的风向和风速记录,分析不同站位海域气溶胶粒子的产生源,从而为我国海上气溶胶分布模型提供参考。大气气溶胶的直接辐射和间接辐射是大气环流、大气气候模型中最不确定的因素,针对黄渤海海域气溶胶的辐射作用,本章节利用 CALIPSO 卫星数据观测垂直方向上,气溶胶的分布特征,为气溶胶长距离输送模型提供参考。北京地区近年来,雾霾天气状况时常发生,对该地区的气溶胶检测方法也得到大力发展,本论文利用 AERONET 网站在北京设立的站点数据,通过体积谱形态、光学厚度和小颗粒比例等数据对气溶胶物理光学特性进行分析,有利于通过国际通道实现对我国部分区域的气溶胶的观测。

## 5 总结与展望

### 5.1 总结

本论文主要研究黄渤海海域和北京地区气溶胶物理光学特性。利用 2011 年 11-12 月的激光气溶胶粒径谱仪测量的数密度数据，AERONET 北京站点的实测资料，以及结合 CALIPSO 卫星 Lever 1 的后向衰减散射系数数据，得出的主要结论如下：

1) 根据仪器 LAP321 测量的黄渤海海表面气溶胶粒子数据，按照不同尺寸分类研究，并对比气溶胶数密度与风向、风速的可视化图，发现受人类活动影响严重的近岸海域，气溶胶数密度值比较大，粒子的尺度范围为  $0.15\mu\text{m} < r \leq 1.0\mu\text{m}$ 。在该海域，除了沙尘暴等恶劣自然现象的影响之外，人为活动和雾霾天气是影响气溶胶数密度值增大的主要因素，而相对湿度对气溶胶数密度的影响较小。尺度为  $1.0\mu\text{m} < r \leq 2.0\mu\text{m}$  范围的气溶胶粒子距离海岸较远些，受人类活动影响较小，主要出现在风源附近，以及风速由小变大的海域附近，大部分粒子是由海-气交换等过程产生的较小尺度的海盐气溶胶。尺度在  $2.0\mu\text{m} < r \leq 5.0\mu\text{m}$  范围的气溶胶粒子，分布在远海处，主要影响因子是风速，是由于大风速使海表面上的浪花破碎产生飞沫，而形成尺度较大的海盐气溶胶粒子。

2) 根据 AERONET 资料，分析了北京地区气溶胶体积谱的季节性分布特征，气溶胶体积谱形态与气溶胶光学厚度、Ångström 波长指数及小颗粒比例的关系，气溶胶粒子大小与单次散射反照率的关系，发现：北京市春季的气溶胶体积谱最大峰值出现在粗模态，主要影响因素是沙尘；夏季的最大峰值一般出现在细模态，主要影响因素是温度和湿度；秋冬季节的粗模态和细模态的峰值比较类似，细模态的峰值半径相对夏季向粒子小的方向偏移，粗模态峰值半径与其他季节相似。夏季的光学厚度最大， $\text{FMF}_{676} > 80\%$ ，细模态粒子占主要成分；春季的光学厚度与夏季稍小， $\text{FMF}_{676} < 75\%$ ，粗模态粒子成分明显增多；秋冬季节的光学厚度比夏季小的多， $75\% < \text{FMF}_{676} < 85\%$ 。通常情况下，当  $\text{FMF}_{676} > 75\%$  时单次散射反照率  $\omega_0$  随波长  $\lambda$  的增大而减小，当  $\omega_0$  最大值时，波长  $\lambda \approx 676$ ；当  $\text{FMF}_{676} < 75\%$  时， $\omega_0$  随  $\lambda$  的增大而增大，当  $\omega_0$  最大值时，波长  $\lambda > 676$ 。若出现相反的状况，则很可能是当地区域吸收性气溶胶的数量增多，

例如黑炭气溶胶和煤烟气溶胶等。

3) 根据 CALIPSO 卫星的 L1 数据, 得到衰减后向散射强度和色比图, 能直观、清晰的观测到大气垂直结构上, 云和气溶胶的分布情况, 而且在没有不可穿透云影响的地区, 晴天的天气状况下, 通过衰减后向散射和后向散射色比图, 能有效分辨出陆地和海表面, 二者的色比值临界点约为 0.2, 即通常情况下, 海表面上色比 $\chi' > 0.2$ , 陆地上色比 $\chi' < 0.2$ 。通过衰减后向散射和后向散射色比数据, 能初步判断当日的天气状况, 如果衰减后向散射数据出现断层、多层、星点状, 则说明当日天气很可能是雨天。

## 5.2 展望

本文使用了现场采集数据、地基 AERONET 网站数据、卫星 CALIPSO 卫星数据对黄渤海海域和北京地区进行了气溶胶物理特性分研究, 分析了黄渤海海域气溶胶水平方向和垂直方向分布特点。本论文的技术路线主要是通过观测数据进行可视化分析, 通过观察法、统计分析法和定量分析法得到结果, 所以在理论研究上存在一定的误差和不确定性, 因此下一步的工作是利用多元回归方法或线性回归方法实现各个参数关系模型的建立。本论文虽然从现场-地基-卫星, 即 LAP321-AERONET-CALIPSO, 三种方式研究大气气溶胶物理特性, 但是缺乏三者之间的关系分析。因此, 在后期的研究过程中, 着重探索研究 LAP321-AERONET, AERONET-CALIPSO 之间的相关分析。

### 参考文献

- [1] 章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程. 第一版. 北京: 气象出版社, 1995, 10~12
- [2] Whitby K.T. Physical characteristics of aerosol. *Atmospheric Environment*, 1978, 12: 135~159
- [3] 董海鹰. 卫星遥感中国近海气溶胶光学特性研究: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学. 2006.
- [4] <http://www.cast.org.cn/n35081/n35668/n35758/n36810/n36915/10212883.html>
- [5] IPCC. Third Assessment Report, Climate Change 2001: The Scientific Basis. New York: Cambridge University Press, 2001
- [6] <http://baike.baidu.com/view/1423678.htm>
- [7] Timothy S. B., Barry J.H., et al., International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Project's first Aerosol Characterization Experiment (ACE-1): Overview. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103 (D13):16297~16318
- [8] Ge V., Frank R., et al., The Second Aerosol Characterization Experiment (ACE-2): meteorological and chemical context, 2000, 52 (2): 126~140
- [9] Satheesh S.K., Ramanathan V. Large Differences in the tropical aerosol forcing at the top of atmosphere and Earth's surface. *Nature*, 2000, 405: 60~63
- [10] Ackerman A.S, Toon O.B. Reduction of tropical cloudiness by soot. *Science*, 2000, 288: 1042~1047
- [11] Quinn P.K, Bates T. Comparison of regional aerosol chemical and optical properties from the European, Asian and the North American plumes. *IGAC activities Newsletter*, 2003, 28: 24~30
- [12] Huebert B.J, Bates T. An overview of ACE-ASIA: Strategies for quantifying. The relationships between Asian aerosols and their climatic impacts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012)*, 2003, 108 (D23): 1~20
- [13] Holben B.N, Eck T.F, et al., A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66 (1):1~ 16
- [14] Holben B.N, Tanre D, et al., An emerging ground based aerosol climatology: aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106 (D11): 12067~12098
- [15] Kaufman Y.I., Tanre D., Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 2002, 419: 215~223

- [16] Bellouin N., Boucher O., et al., Global estimate of aerosol direct radiative forcing from satellite measurement. *Nature*, 2005, 438: 1138~1141
- [17] Haywood J.M., Ramaswamy V., Soden B.J. Tropospheric aerosol climate forcing in clear-sky satellite observations over the oceans. *Science*, 1999, 283 (5406): 1299~1303
- [18] G.Loeb N., Manalo-Smith N. Top-of-atmosphere direct radiative effect of aerosols over global oceans from merged CERES and MODIS observations. *Journal of Climate*, 2005, 18: 3506~3526
- [19] Tianle Y., Zhangqing L., et al., Increase of cloud droplet size with aerosol optical depth: An observation and modeling study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012)*, 2008, 113 (D4): 27
- [20] Jianglong Z., Christopher S.A. Longwave radiative forcing of Saharan dust aerosols estimated from MODIS, MISR and CERES observations on Terra. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(23): doi: 10. 1029 /2003GL018479
- [21] Ramanathan V., Crutzen P.J., et al., Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, 2001, 294(5594): 2119~2124
- [22] Ackerman A.S., Toon O.B., et al., Reduction of tropical cloudiness by soot. *Science*, 2000, 288(5468): 1042~1047
- [23] Albrecht BA. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, 1989, 245 (4923): 1227~1230
- [24] Daniel R. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 2000, 287(5459): 1793~1796
- [25] Lidia M., Stephen T., et al., The modality of particle size distributions of environmental aerosols. *Atmospheric environment*, 1999, 33(27): 4401~4411
- [26] Grini A., Myhre G., et al., Modeling the annual cycle of sea salt in the global 3D Model Oslo CTM2: concentrations, fluxes, and radiative impact. *Journal of Climate*, 2002, 15 (13): 1717~1730
- [27] Kiyoshi M., Mitsuo U. Geographical distribution of particle number density in the accumulation mode range over the North Pacific Ocean. *Atmospheric Research*, 2009, 92 (2): 251~257
- [28] 李积明, 黄建平, 等. 利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征. *大气科学*, 2009, 33(4): 698~707
- [29] 吕达仁, 周秀骥, 邱金桓, 等. 消光-小角散射综合遥感气溶胶分布的原理与数值实验. *中国科学*, 1981, 12(12): 1516~1523

- [30] 邱金桓, 等. 消光-小角散射法遥感气溶胶谱分布的实验研究. 大气科学, 1983, 7(1): 33~41
- [31] 赵崑, 等. 黄海、东海上空春季气溶胶光学特性观测分析. 海洋学报, 2005, 3, 27(2): 46~53
- [32] 韩冰, 高飞, 等. 气溶胶光学特性的反演方法研究. 海洋技术, 2006, 9, 25(3): 55~61
- [33] Peng Lin, Min Hu, et al., Marine aerosol size distributions in the springtime over China adjacent seas. Atmospheric environment, 2007, 41(32): 6784~6796
- [34] 吕子峰, 等. 北京市夏季二次有机气溶胶生成潜势的估算. 环境学报, 2009, 4(30): 969~970
- [35] 邓学良. 卫星遥感中国海域气溶胶光学特性及其辐射强迫研究: [博士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2008
- [36] 丛丕福, 等. 渤海海上空气溶胶遥感探测与分析. 海洋环境科学, 2008, 8, 27(supp. 2): 67~69
- [37] 董文. 中国北黄海海区大气气溶胶光学特性观测研究: [硕士毕业论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2009
- [38] 赵一鸣, 江月松, 等. 利用 CLIPSO 卫星数据对大气气溶胶的去偏振度特征分析研究. 光学学报, 2009, 11, 29(11): 2944~2951
- [39] 朱恩云, 马骏. 中国大气气溶胶研究现状. 环境科学与管理, 2008, 12, 33(12): 57~59
- [40] 刘玉光. 卫星海洋学. 北京: 高等教育出版社, 2009. 138~141
- [41] Deirmendjian D. Scattering and polarization properties of water clouds and hazes in visible and near infrared. Applied Optics, 1964, 3(2): 187~196
- [42] 张鹏, 石广玉. 从反射太阳光谱反演大气气溶胶体积谱分布的理论研究. 气象学报, 2003, 61(1): 85~94
- [43] Anders Ångström . The parameters of atmospheric turbidity. Tellus, 1964, 16(1): 64~75
- [44] Kaufman Y. J., Smirnov A., et al., Baseline maritime aerosol: methodology to derive the optical thickness and scattering properties. Geophysical Research Letters, 2001, 28 (17): 3251~3254
- [45] 杨溯, 石广玉, 等. 气溶胶光学厚度谱特征判断粒子大小方法初探. 应用气象学, 2011, 22 (2): 153~156
- [46] Dubovik O., Holben B., Thomas F. E., et al., Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Type Observed in Worldwide Locations. Journal of the Atmospheric Sciences, 2002, 59 (3): 590-608

- [47] Hyeong D.K., Byung J.S., et al., Aerosol optical properties over East Asia determined from ground-based sky radiation measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2004, 109 (D02): doi: 10.1029/2003JD003387
- [48] Tanré D., Kaufman Y.J., Holben B.N., et al., Climatology of dust aerosol size distribution and optical properties derived from remotely sensed data in the solar spectrum. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106 (D16): 18205~18217
- [49] Remer L.A., Kaufman Y.J., Holben B.N. Interannual variation of ambient aerosol characteristics on the east coast of the United States. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104 (D2): 2223~2232
- [50] 王耀庭, 等. 大气气溶胶性质及其卫星遥感反演. *环境科学研究*, 2005, 18(6): 27~33
- [51] Chylek P., Coakley J.A. Aerosols and climate. *Science*, 1974, 183 (41): 75~77
- [52] 邵士勇, 黄印博, 等. 单分散长椭球形气溶胶粒子的散射相函数研究. *光学学报*, 2009, 1, 29(1): 108~113
- [53] Tang H., Xiaogang S., Guibin Y. Calculation method for particle mean diameter and particle size distribution function under dependent model algorithm. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(1): 31~33
- [54] 韩道文, 刘文清, 刘建国, 等. 气溶胶质量浓度空间垂直分布的反演方法. *中国激光*, 2006, 33 (11): 1567~1573
- [55] 王明军, 吴振森, 李应乐, 等. 全尺寸目标激光脉冲后向散射回波功率测定和建模. *中国激光*, 2006, 33 (11): 1557~1561
- [56] 李学彬, 胡顺星, 等. 大气气溶胶消光特性和折射率的测量. *强激光与粒子束*, 2007, 02, 19 (2): 207~210
- [57] 陈义珍, 等. 北京市冬季气溶胶粒子尺度谱分布研究. *安全与环境学报*, 2006, 2, 6 (1): 80~84
- [58] Dubovik O., Michael D. K. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2000, 105 (D16): 20673~20696
- [59] 王中挺, 等. 从MODIS数据反演粗细粒子气溶胶. *光谱学与光谱分析*, 2011, 10 (31): 2809~2010
- [60] Toshihiko T., Nakajima T., et al., Aerosol distributions and radiative forcing over the Asian Pacific region simulated by Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species (SPRINTARS). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2003, 108

- (D23): doi:10.1029/2002JD003210
- [61] 林俊, 等. 大气气溶胶粒径分布特征与气象条件的相关性分析. 气象与环境学报, 2009, 25 (1): 1~5
- [62] Eck T.F., Holben B.N., et al., Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2005, 110 (D6): doi: 10.1029/2004JD005274
- [63] Robert A., Kotchenruther, Peter V.H. Humidification factors of aerosols from biomass burning in Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1998, 103 (D24): 32081~32089
- [64] [http://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/pdfs/PC-SCI-202\\_Part2\\_rev1x01.pdf](http://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/pdfs/PC-SCI-202_Part2_rev1x01.pdf).
- [65] [http://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/pdfs/PC-SCI-202\\_Part3\\_v1.0.pdf](http://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/pdfs/PC-SCI-202_Part3_v1.0.pdf).
- [66] [http://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/pdfs/SPIE\\_5575-4.pdf](http://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/pdfs/SPIE_5575-4.pdf).

## 致谢

感谢阎逢旗导师三年来对我的关怀、指导和培养！

感谢国家自然科学基金（40876017, 417076116）的资助！

感谢海洋技术系全体老师的精心指导和宝贵帮助！

感谢陈艳、汤佳沅、郭祺等同学的帮助、协作、友情！

感谢家人的支持、鼓励和关爱！

感谢所有帮助过我的人！

感谢海洋遥感研究所！

感谢中国海洋大学！

## 个人简历、在校期间发表的学术论文

### 个人简历

1985年11月12日出生于山东省济宁市泗水县。

2006年9月考入青岛科技大学电子信息与自动化学院自动化专业，2008年7月本科毕业并获工学学士学位。

2010年9月考入中国海洋大学信息科学与工程学院摄影测量与遥感专业至今。

### 发表的学术论文

阎逢旗，宋怀荣，北京市大气气溶胶粒子体积谱特性分析，已于2012年10月28日，被《中国海洋大学学报(自然科学版)》录用，拟于2013年第43卷第9期(2013年09月15日出刊)发表。