

中国海洋大学

硕士学位论文

中国北黄海海区大气气溶胶光学特性观测研究

姓名：董文

申请学位级别：硕士

专业：物理海洋学（海洋技术）

指导教师：陈文忠

20090601

中国北黄海海区大气气溶胶光学特性观测研究

摘 要

本文作者使用了三个航次的实测数据来分析我国北黄海海区气溶胶光学特性, 这些数据是: 2006 年 4 月春季 SOLAS 航次、2007 年 1 月冬季 908 航次及 2007 年 10 月秋季 908 航。试验中使用了日本 PREDE 公司生产的 POM-01MKII 7 波段全自动天空辐射计, 对我国北海黄海海区的气溶胶光学厚度、单次散射反照率、气溶胶粒径体积谱分布及相函数进行了分析, 同时, 对北黄海海区气溶胶的时空分布特性及变化规律进行了研究, 并简单分析了我国沙尘暴、煤烟等大气污染过程对气溶胶分布的影响。

研究表明, 气溶胶光学厚度在晴天无云情况下, 春季高于秋季和冬季, 这是因为春季属于沙尘、多雾天气, 对大气气溶胶光学特性的影响很大。春、秋、冬三季, 春天受到沙尘的影响, 秋天受到陆源气溶胶的影响, 冬天有烟煤的影响, 使得这三个季节在一些站位的气溶胶有着较强的吸收, 总体呈现出离岸近吸收较强、离岸远吸收较弱的趋势。从粒径体积谱来看, 由于海洋上空的气溶胶变化非常快, 气溶胶中的大小粒子的含量变化也比较快, 大体上光学厚度大、有强吸收的地方所含粗粒子、同温层气溶胶粒子、海盐粒子含量都比较高。相位函数显示, 在有吸收的地方, $150\sim 180^\circ$ 散射角处散射强度比没有吸收时的值要小。在这三个季节里, 气溶胶整体上呈现强的前向散射。

关键词: 气溶胶光学厚度, 气溶胶粒径体积谱, 单次散射反照率, 相位函数, 沙尘, 煤烟

Observations and Analysis of Aerosol Optical Properties over the Northern Yellow Sea of China

Abstract

In this dissertation, in-situ aerosol observations from three cruises were used to analyze the aerosol optical properties over the Northern Yellow Sea of China. The three cruises were SOLAS in spring 2006, 908 in winter 2006 and 908 in autumn 2007. A ship-borne seven bands sky-radiometer (POM-01MKII from PREDE Co., Japan) was used to make automatic aerosol observations during the cruises, and aerosol optical properties such as aerosol optical thickness, single scattering albedo, particle size distribution and phase function were retrieved from the collected data. Based on the data, spatial and temporal distributions and seasonal variations of aerosol optical properties in the study area were analyzed, and possible effect of atmosphere pollution like dust and soot were also investigated.

The results show that the aerosol optical thickness in spring is larger than that in autumn and winter. It is possibly due to the frequent occurrence of weather conditions like dust and haze in the spring season, which will largely affect the atmosphere aerosol properties. Dust aerosol in spring, continental aerosol in autumn and soot aerosol in winter, may affect the compositions of aerosols over the ocean. It shows that the absorption of aerosol is inverse proportional to the distance of the observation site to the land. The particle size distributions also indicate, the ratios of coarse mode and fine mode of aerosol particles usually change very frequently. Sites with strong absorption contain more coarse particles, sea-salt and stratospheric aerosol particles than sites without absorption. The aerosol phase functions show lower scattering intensities at the sites with absorption than that at the sites without absorption for scattering angles in the range of 150 to 180 degrees. And strong aerosol forward scattering intensities were observed in all three seasons.

Key words: aerosol optical thickness, aerosol size distribution, single scattering albedo, phase function, dust, soot

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。

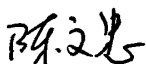
学位论文作者签名：

签字日期：2007年5月30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：

导师签字：

签字日期：2007年5月30日

签字日期： 年 月 日

知识产权保护协议

依据《中华人民共和国促进科技成果转化法》第二十八条和《中国海洋大学知识产权管理暂行规定(2004.7.20)》的有关规定,研究生董文(以下简称研究生)与其导师陈文忠(以下简称导师)就知识产权保护事宜达成如下协议:

1、研究生在校期间从事科研工作所完成的学位论文以及不论是否写入学位论文的其他成果属职务成果。研究生不得对上述职务成果以自己或他人名义擅自向第三方转让或泄漏。

2、研究生离校后三年内,不得擅自将在在校期间从事科研工作的相关数据、研究结果和相关技术发表论文,不得擅自向第三方转让或泄漏。。

3、研究生离校后三年内,若进行重复及延续在校研究课题的科技项目,必须经导师及中国海洋大学同意并协商知识产权分享事宜后,方可开展工作。

4、若研究生违反上述规定,导师及中国海洋大学有权追究其法律责任,即:要求其停止侵权行为、公开消除影响并予以经济赔偿。

5、本协议双方签字之日起生效,有效期三年。

研究生(签字):董文

导师(签字):陈文忠

2009年5月30日

课题负责人(签字):力军

2009年6月30日

第一章 前言

1.1 研究背景

大气气溶胶是指大气与悬浮在大气中的各种固态和液态的粒子组成的一个多相体系, 尺度范围从 $0.001\mu\text{m}$ 的分子团到 $100\mu\text{m}$ 的尘埃、云滴, 跨越 5 个量级^[1]。大气气溶胶主要分布在对流层底层几公里范围内, 粒子浓度随垂直高度的升高一般呈指数下降^[2]。气溶胶的尺度、来源、化学组分、浓度以及粒径谱分布随时间和空间有很大变化。

大气气溶胶对太阳辐射的散射、吸收作用直接影响地球大气的辐射平衡, 并通过成云作用及非均相化学反应参与大气中的各种化学过程, 影响其他温室气体成分的源汇, 对全球气候变化有着重要的作用。

亚洲区域是全球最大的气溶胶源区之一, 存在各种类型的气溶胶, 而且其成分和尺度分布随时间和空间的变化很大。亚洲区域主要的吸收性气溶胶包括每年春季爆发的、来自蒙古和我国西北部沙漠地区的沙尘(Dust)或称黄沙气溶胶, 还有由于人类活动产生的煤烟(Soot)或称黑碳(Black Carbon)。亚洲沙尘携带铁等营养物质通过大气长距离输送沉降到海洋中, 有可能增加海域的营养盐水平并影响海域初级生产力, 进而影响海洋对 CO_2 的吸收, 并间接地对气候产生显著影响; 黄沙气溶胶的影响范围很广, 通过风的作用甚至被输送至北美大气中^[3-5]。Menon 等^[6]发表在《SCIENCE》上的一份研究报告也指出, 大量的煤烟粒子及其它污染物正在引起我国降雨和温度的变化, 可能是导致我国过去几十年中南涝、北旱灾害的部分原因。这些气溶胶粒子对人类的健康也有很大的影响。伴随着我国经济增长, 由于大量使用原煤、能耗高、利用率低且浪费严重, 造成我国的煤烟型大气污染严重, 且随着大气的循环也将影响到亚洲其它区域。因此, 亚洲气溶胶的研究也得到了国际上的广泛重视。

气溶胶还与一些环境问题, 如臭氧层的破坏、酸雨的形成、烟雾事件的发生等密切相关。此外, 气溶胶对人体和其他生物的生理健康也有特定的影响。20 世纪世界十大公害事件有八次是由烟尘或气态污染物质引起的。流行病学研究发现, 人体肺部功能的下降、呼吸系统疾病的增多和正在逐年增加的死亡率与大气中气溶胶粒子浓度的上升存在着紧密的联系。因此, 进行大气气溶胶的含量、尺

度谱、散射和吸收特性及其时空分布的精确测量与研究是气候学家、环境学家和大气科学家共同关心的问题。

大气气溶胶对卫星海色遥感有极其重要的影响。我国海色遥感目前面临的问题主要是近岸浑浊二类水体和吸收性气溶胶,这也是国际上普遍关注的焦点。国际上标准的海色反演方法在我国海域并不完全适用,如在渤海湾、长江口附近等,由于大气污染或高浑浊水体,使得反演的误差很大^[7]。所以,对我国海区大气气溶胶分布和大气气溶胶光学特性的研究,开发适合我国海域特点的海色遥感反演算法提供参考的依据。

1.2 国内外研究现状

气溶胶科学的初创时期主要研究工作有:Tyndall(1896)进行的气溶胶光学实验,随后 Rayleigh(1871)提出光的散射理论,这些研究工作是近代气溶胶科学的开端;接着 Aitken(1880)发现存在很小的核,并对质粒的力学进行研究(1884),Wilson(1897)对核化作了经典研究,Einstein(1905)提出布朗运动理论,并建立了气溶胶质粒特征类同于大分子的微观近似同连续流体理论演绎之间的联系。这些出色的研究成果代表了气溶胶科学的发展进入鼎盛时期。1955年,RYKC 出版了《气溶胶力学》,对当时气溶胶力学作了经典性概括和总结,标志着经典气溶胶科学时代的终结^[8]。

现代科学技术的飞速发展,为气溶胶科学兴盛奠定了理论基础,创造了实验探测和数值模拟的条件,并不断渗透到基础学科。气溶胶科学已成为大气科学的重要分支学科,具有显著的边缘学科性质。它所涉及的领域与大气物理(云物理、大气辐射传输、大气光学、大气电学)、空气污染、大气化学、高层大气学、气候学、环境工程和工程技术、医疗卫生等学科密切相关^[9]。

90年代以来,由于气溶胶的气候效应问题,气溶胶再次成为国际学术界的热点之一,大气气溶胶是当今大气化学研究中前沿的领域。国际大气化学研究计划(IGAC)科学指导委员会于1994年将国际全球大气化学研究计划和国际气溶胶计划合并重组,大气气溶胶研究被列为3大研究方向之一。1995年IGAC(International Global Atmospheric Chemistry)组织了第一次气溶胶特性实验(ACE-1),为期一个月,从11月15日到12月15日,地点选在澳大利亚南部海域。ACE-1关注自然源海洋气溶胶的性质^[10]。通过研究发现在远离大陆的澳大利

亚南部海域,人为活动对气溶胶的影响很小。海盐是这个海域的主要化学成分,决定了气溶胶的光学性质。海盐中的细粒子和粗粒子气溶胶是散射主体,其中,粒径在 $0.2\sim 1.0\mu\text{m}$ 的气溶胶散射效率最高。细粒子气溶胶 550nm 波长光的散射系数介于 $0.66\sim 38\text{Mm}^{-1}$ 之间,而粗粒子气溶胶的散射系数数值变化较大,从 $1.7\text{Mm}^{-1}\sim 130\text{Mm}^{-1}$, 单次散射反照率 ω 平均值为 $0.99 \pm 0.01^{[11]}$ 。Carrico 等(1998)还指出,相对湿度与粒径是决定气溶胶光学性质的重要因子。不同粒径的气溶胶,其散射系数有较大差别;粒径相同的气溶胶,相对湿度的变化会引起散射系数的较大改变;波长对散射系数的影响不如这两个因子显著^[12]。

在 ACE-1 期间获得的大量结果增加了人们对气溶胶的了解,其综合观测方法得到广泛认可。1997 年 IGAC 年组织了第二次气溶胶特性实验(ACE-2),时间为 6 月 16 日到 7 月 24 日,地点设在副热带大西洋东北部,关注从欧洲大陆输送到海洋大气中的气溶胶^[13]。通过研究发现 ACE-2 期间,气溶胶(粒径小于 $10\mu\text{m}$)对 550nm 光的散射系数为 $5.3\sim 160\text{Mm}^{-1}$, 细粒子气溶胶散射作用占总气溶胶的 45%。与 ACE-1 期间相比,ACE-2 期间细粒子气溶胶的散射作用有很大的增强,由于这两次实验中海盐浓度差别不大,细粒子气溶胶散射作用表现的不同主要是由于 ACE-2 期间非海盐细粒子气溶胶浓度的增加。陆地上单次散射反照率 ω 的平均值高于海洋。同样,陆地上的阿斯特朗常数 A 的平均值也明显比海洋上的高,说明陆地细粒子尺度的气溶胶浓度更显著。这两次气溶胶特性实验的共同结果是局地风速与海盐气溶胶质量浓度没有明显的相关关系。

1999 年 IGAC 组织了 INDOEX(India ocean Experiment),关注来源于印度次大陆的气溶胶。在这次实验中发现了来自印度次大陆的气溶胶中含有大量的细粒子颗粒物,而且 EC 的含量比较高^[14-15]。此次实验测得的单次散射反照率在 IGAC 所组织进行的气溶胶特性实验中是最低的。在印度次大陆地区观测到一种外观呈现褐色的气溶胶云团,被指称为“亚洲灰霾”(Asian Brown Cloud),一时间引起科学界和其他社会各界的广泛关注。高空和地表的太阳辐射通量的测量值表明:由于这种灰霾对太阳辐射的削弱作用,使得到达地表的太阳辐射减小值相当于清洁大气条件下大气层顶反射掉的太阳辐射的四倍^[16]。此外,这种灰霾中含有大量的 EC(元素炭),一方面,它吸收太阳辐射导致了地表较强的负辐射强迫。另一方面,由于 EC 吸收太阳辐射加热边界层导致云的蒸发,使得更多的太阳辐射到

达地表,引起地表增温^[17]。

亚洲沙尘气溶胶向下游输送过程中经过许多工业城市地区,许多学者认为混合着煤烟的沙尘气溶胶对辐射有相当重要的吸收作用^[18]。2001年春季IGAC组织了亚洲气溶胶特性实验(ACE-Asia),地点选在西太平洋,关注沙尘气溶胶输送到海洋的性质。用颗粒物烟雾吸收光度计(Particle Soot Absorption Photometer 简称 PSAP)与积分浊度计分别测量吸收系数和散射系数,得出ACE-Asia期间受沙尘污染的大气气溶胶 ω 的平均值为 0.94 ± 0.03 ,而受沙尘污染很小的对流层高层的平均值为 0.95 ± 0.02 ,这两个值很接近^[19]。通过研究发现混合煤烟的沙尘气溶胶并没有如许多学者估计那样显示出特殊的吸收作用,显著影响 ω 的值^[20]。有关ACE-Asia的深入研究仍然在进行中,其早期成果也陆续出现在近期的各类期刊上。

到目前为止,在气溶胶光学性质的观测研究方面,以IGAC组织的多次气溶胶特性实验最为全面,包括海洋上空多个高度层的观测,结合轮船和飞机进行综合测量,所获数据和已取得的成果对于气溶胶的进一步研究有着重要意义。Holben^[21]等人利用CIMEL太阳光度计,提出并建立了全球自动观测网AERONET,以获得全球气溶胶光学参数及其分布。Smirnov^[22]等人利用太平洋和大西洋等海域海岛上的AERONE站的CIMEL太阳光度计的观测资料,分析了改海域的气溶胶光学性质以及不同的海域之间的差异。Vinoj和Satheesh^[23]等人利用2002年阿拉伯海夏季季风期间的Microtops太阳光度计观测资料对气溶胶光学参数进行了分析,得出了该海域大气气溶胶光学特性,Smirnov^[24]等人利用2004年R/V Akademik Sergey Vavilov船上搭载的MrerotopsII太阳光度计观测资料对比卫星和GOCART模式对气溶胶光学参数进行分析研究。

这些计划和实验的开展实施为我们研究气溶胶特性遥感方法提供了有力的支持。

小注:气溶胶特性实验ACE(Aerosol Characterization Experiment),它包括南半球(ACE-1)、北大西洋区域(ACE-2)、亚洲太平洋区域(ACT-Asia)气溶胶特性实验,对流层气溶胶辐射强迫实验TARFOX(Tropospheric Aerosol Radiative Forcing Obserbational Experiment)和印度洋实验INDOEX(Indian Ocean Experiment)。

对于海洋上空大气气溶胶的研究工作我国的学者也做了一些研究,例如:赵

柏林^[26]等利用NOAA AVHRR 资料进行了遥感海上大气气溶胶的研究。张军华^[26]等研究了利用GMS-5卫星的可见光通道资料遥感湖面上空大气气溶胶光学厚度的可行性,并指出了GMS-5可见光通道资料的优点和局限性。2000年李正强^[27]等在黄海水域的灵山岛上使用法国Cimel公司的自动追踪太阳辐射计CE318对该地区上空气溶胶特性做了研究,研究表明:黄海水域大气气溶胶主要由自然来源的气溶胶构成,气溶胶光学厚度在0.1左右,光学厚度的日变化和逐日变化不大,Ångström 波长指数约为1.2,大气混浊度指数在0.05左右。2003年国家卫星海洋应用中心的唐军武^[28]等研究了黄海,东海上空春季气溶胶的光学特性,得出结论如下:无云情况下黄海、东海上空的气溶胶光学厚度在0.2-0.4左右,且气溶胶粒子谱分布的变化趋势也很接近;海区上空阴霾层较厚时测量得到的气溶胶光学厚度明显增大,最大接近0.8;气溶胶粒子谱分布的变化趋势发生了明显的变化。周良明^[29]等人利用MicroTOPS II手持太阳光度计和臭氧检测仪对渤海海域上空2003年8月中下旬的大气衰减进行了分析。国家气象局气候研究开发实验室的申彦波^[30]等使用SOLAS实测数据研究了2006年春季我国东部海域气溶胶光学厚度和沙尘天气,他指出:东海海域气溶胶光学厚度在晴天,有云和浮尘这三种典型的天气下的平均值在0.2, 0.6, 1.3以上;2006年春季我国东部海域550nm的气溶胶光学厚度大部分时间在0.2以上,平均值为0.5,大气比较混浊;空间分布特征是自西北向东南逐渐减小,陆地明显比海洋大;其总体时空变化与我国北方沙尘天气发生的强弱多寡密切相关。刘大召^[31]等人利用中科院南海海洋研究所2006年9月公开航次的MicroTOPS II手持太阳光度计资料,分析了南海北部海域的气溶胶光学厚度。

可以看出,国内学者在大气气溶胶的光学特性方面做了许多研究工作,但与国外在这方面的研究相比,不管是研究的深度还是广度都有待于加强,特别是海洋上空大气光学特性的研究方面。

1.3 研究意义和目的

本论文的目的在于利用北黄海水区大气气溶胶实测数据来分析该海区气溶胶的时空分布和气溶胶光学特性,研究我国每年的沙尘暴、工业大气污染等过程对该海区气溶胶时空分布的影响。这一研究对于开发适合我国海域特点的海色遥感反演算法、提高我国海色产品的精度、更好地为我国的海洋灾害监测及海洋开发

服务具有重要的参考价值。同时,了解该地区上空气溶胶的变化情况,对于环境治理、科学研究和遥感业务都有重要的现实意义。

1.4 论文结构及主要内容

- 第一章 概述了大气气溶胶的研究背景和研究内容,具体介绍了国内外海洋上空大气气溶胶的研究现状,然后说明研究北黄海海区大气气溶胶的研究意义和目的
- 第二章 介绍了研究气溶胶光学特性的一些基础的知识,包括气溶胶的来源,气溶胶的主要类型,以及表征气溶胶光学特性的一些参数(光学厚度,单次散射反照率,粒径体积谱分布,相函数)。
- 第三章 介绍了北黄海海区气溶胶观测实验的一些知识,有仪器的结构及观测原理,表征气溶胶光学参数的的反演算法,以及获取数据的一些常规资料。
- 第四章 对三个航次的数据进行了逐一的分析,并且得出每个航次的气溶胶光学参数的一些特性,最后对三个航次中重叠的六个典型站位做了随季节变化的分析
- 第五章 对文章的主要内容进行总结,同时提出下一步计划

第二章 气溶胶光学特性的基础知识

2.1 气溶胶的来源

大气气溶胶是由自然过程和人类活动两者产生的。自然源气溶胶包括火山尘、林火烟雾、海沫盐粒、风吹尘、以及自然界的气体发生化学反应而产生的小粒子。人为产生的气溶胶包括燃烧过程直接排放的粒子以及由燃烧排放气体而形成的粒子。在人为活动的影响下，大气中人为排放的气溶胶逐年增加。大气气溶胶浓度随地点而变化，最大浓度通常出现在城市和沙漠地区。在正常情况下，背景气溶胶浓度具有约 20~50km 的能见度。在对流层中通常随高度的增加而迅速减小。一些气溶胶是有效的凝结核和冰核，在其上可以形成云粒子。对吸湿性气溶胶而言，气溶胶的大小取决于相对湿度。

2.2 气溶胶的主要类型

气溶胶的种类有很多不同的定义，按照其特点和类型来划分，气溶胶又分为大陆型、海洋型和极地型三类。大陆型气溶胶又细分为清洁的（农村、森林）、一般的、沙漠的（背景情况，有风），以及城市的和工业的几种情况。这种类型的气溶胶，其成分包括水溶性粒子、尘状粒子、烟尘（Soot）粒子和矿物粒子。海洋型气溶胶又可进一步细分为清洁的、矿质的和污染的几种情况，其主要成分包括海盐粒子、矿物粒子、硫酸盐粒子和烟尘粒子等。极地型气溶胶细分为污染的、北极清洁的、南极清洁的几种情况，包括烟尘粒子，矿物离子，海盐粒子，硫酸盐粒子。海盐粒子则是由风的作用在海面生成的海水飞沫蒸发形成，包含 30% 的海盐和 70% 的水。75% H_2SO_4 液滴常常用来代表平流层气溶胶。在太阳的可见光区，海洋粒子和硫酸盐粒子的吸收是相当小的；而矿物粒子、尘埃粒子及水溶性的粒子，尤其是烟尘粒子的吸收则是相当大的。在较湿的环境环境中，气溶胶与周围的水汽相互作用，这种作用会对它们的尺度、形状和化学成分产生影响，最终会影响它们的光学性质。在同一海区发现多种多样的气溶胶类型，这说明在某种程度上，它们一定是受与大气环流有关的输送过程的控制^[32]。

2.3 气溶胶光学特性的表征参数介绍

大气气溶胶做为大气订正的重要因子之一，研究其光学特性是十分必要的。大气气溶胶的基本光学参数包括光学厚度（AOT），单次散射反照率（SSA），尺

度谱分布, 相函数 (PHS), 折射率。下面分别介绍一下:

2.3.1 气溶胶光学厚度

气溶胶光学厚度是气溶胶对辐射消光能力的反映, 是气候研究中的重要参数之一。在可见光和近红外波段, 气溶胶的光学厚度主要是由气溶胶对电磁波的散射引起的。气溶胶散射的计算比较复杂; 由于气溶胶粒子远大于大气分子, 所以不能使用瑞利散射理论进行研究。

当气溶胶满足 Junge 谱分布时, 即在 Junge 气溶胶谱类型和气溶胶复折射指数与波长无关条件下, 气溶胶光学厚度与波长的关系式满足下式

$$\tau_{\lambda}(\lambda, Z) = \alpha \lambda^{-\beta} \quad (1)$$

(1) 式中 β 是埃斯特朗 (Angstrom) 指数, 它与气溶胶的粒径有关, 能反映气溶胶粒子谱分布情况, 也称为气溶胶的尺度因子; β 值越大表明气溶胶小粒子的密度越高, 值越小表明气溶胶大粒子的密度越高。而 α 为 Angstrom 大气浑浊度系数, 是波长 $1 \mu\text{m}$ 处大气气溶胶光学厚度, 它与气溶胶的粒子浓度有关; α 值越大气溶胶浓度越大^[33]。一般情况下, 在靠近陆地的海域, 陆源性气溶胶常常占优势, 气溶胶散射的光学厚度较大; 在较远离陆地的海域, 海源性气溶胶常常占优势, 气溶胶散射的光学厚度较小。

2.3.2 单次散射反照率

单次散射反照率是用来表示一次散射过程中散射光强在整个削弱光强中所占的比例, 其表达式为:

$$\omega_0 = \frac{K_s}{(K_s + K_a)} \quad (2)$$

(2) 式中、 K_s 和 K_a 分别为散射系数与吸收系数。而且在给定的波长下, 单次散射反照率也可以表示为气溶胶散射光学厚度与气溶胶总光学厚度的比值^[34]。 ω_0 的变化对地球上的太阳辐射平衡有重要的影响, ω_0 主要取决于介质的折射指数 (复合介电常数)。而折射的虚部表示大气气溶胶的吸收特性。折射指数不仅于环境因素有关, 更主要由气溶胶的化学组成决定。一般认为气溶胶的吸收能力取决于其中碳元素含量, 而且与波长及粒子尺度有关。

2.3.3 粒径尺度谱分布

粒径尺度谱分布来表示, 垂直大气柱单位截面上含有的气溶胶粒子数或者体积数。

气溶胶粒子的尺度谱分布大致有四种^[35]: Junge 立方分布, Gamma 分布函数, 对数正态分布(log-normal)函数和对数二次曲线分布。但是由于气溶胶粒子小而分散, 它的直径范围从 10^{-3} 微米到几微米甚至 10^3 微米。因此常用的是将气溶胶尺度谱分布模型化成几个对数正态分布模态的和:

$$\frac{dN}{d\ln r} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_i}} \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_{mi})^2}{2 \ln^2 \sigma_i} \right] \quad (3)$$

其中 r_{mi} 是第 i 个对数正态分布的模态半径 (mode radius), σ_i 是模态的标准偏差 (standard deviation), N_i 是数密度 (number density)。Junge 幂分布函数也因为其公式简单而被经常使用, 其公式为:

$$n(r) = cr^{-(v+1)} \quad (4)$$

(4) 式中 r 是假定为球形的气溶胶粒子的半径, v 和 c 是 Junge 参数, c 与气溶胶的浓度成正比, v 的变化范围在 2.0 和 4.0 之间。

2.3.4 相函数 (Phase Function)

相函数是用来表达散射能的角分布的^[36], 它是一个无量纲参数, 其定义如下:

$$P(\theta) = \frac{\text{某方向的散射能量}}{\text{各向同性散射时该方向的散射能量}}$$

$$\text{且有} \quad \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} P(\theta) d\Omega = 1 \quad (5)$$

上式称为相函数的归一化条件。

散射强度的表达式为:

$$I(\Theta) = I_0 \frac{\sigma_s}{r^2} \frac{P(\Theta)}{4\pi} \quad (6)$$

(6) 就是散射强度的普遍表达式, 它不仅对分子适用, 而且对尺度大于入射波长的粒子也适用。上式也反应了相函数和散射强度的关系。

第三章 海洋气溶胶观测实验

随着时间的推移,一大批可以用来观测气溶胶的方式纷纷涌现,比如依靠卫星,陆地气溶胶观测网络,但是海上气溶胶的观测的特殊性使得对仪器的要求很高。

气溶胶的观测陆地上大气气溶胶的定点观测,代表性的主要有美国 NASA 协调的全球气溶胶网(AERONET),其中的主要仪器是法国 Cimel 公司的 CE-318 太阳光度计(Sun Photometer),我国气象部门也广泛采用;在亚洲有日本组织的天空辐射计网(SKYNET),主要仪器是日本 PREDE 公司的天空辐射计(Sky Radiometer),它们都可以进行无人值守的自动、连续观测。在海上进行测量由于平台的要求,更加困难,对仪器和使用者都有更高的要求。海上常用的大气气溶胶现场测量仪器主要分为两类:一类是手持式太阳光度计,典型的有 Science and Engineering Services,Inc.(SESI)的微脉冲激光雷达(Micro-Pulsed Lidar:MPL),Solar Light Co.的 Microtops II Sunphotometer,以及 Laboratoire d'Optique Atmosphérique 的 SIMBAD 及其改进版 SIMBADA,这类仪器一般需要手动进行观测;一类是可安装在船上进行自动观测的仪器,如日本 PREDE 公司的天空辐射计 POM-01MKII,就是专门针对船载使用要求而开发的仪器。

3.1 仪器结构以及观测原理

北黄海海区气溶胶光学特性的观察实验使用的是由日本 PREDE 公司生产的 7 波段全自动天空辐射计(POM01 MARK II),它用来测量不同光谱波段的太阳直射光及周围漫射光的强度,来推算大气气溶胶的光学厚度,单次反照率,折射率,粒径体积分布,相函数,直射光能量分布。在感光部装有太阳追踪设备,利用太阳光传感器对太阳的位置进行定位,因此可以对太阳进行自动追踪。观测到的数据经微机处理后贮存在计算机中。此仪器是为了在船上进行观测而开发的仪器,在仪器的顶部装有 CCD 相机,即使在船摇晃的情况下,无论太阳在哪个方向,均可追踪^[37]。

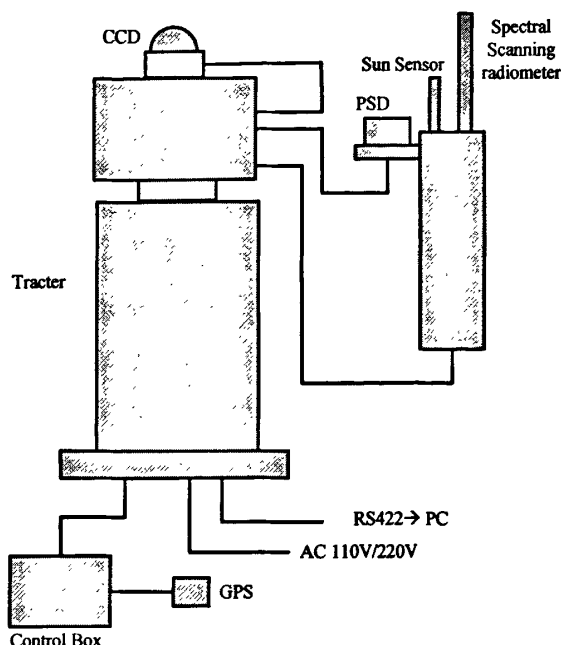


Fig.1 结构示意图

POM01 MARK II 是一个海陆两用的全自动仪器,它由以下几个部分组成:

CCD(Charged Coupled Device) :在船移动时记录太阳的位置。

PSD: 在船移动时, 保持跟踪太阳。

SUN SENSER: 在船移动时候可以保持跟踪太阳。

SPECTRAL SCANNING RADIOMETER: 主要的光学仪器。

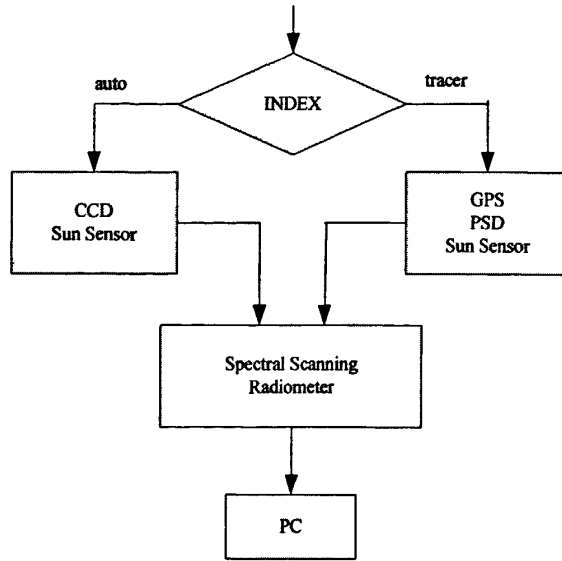
GPS: 获取经纬度和时间。

TRACKER: 保持仪器转动。

CONTROL BOX: 协调仪器各个部分的工作同时把获取的数据输入电脑

本仪器通过对 7 个波段 (315, 400, 500, 675, 870, 940, 1020) 的太阳直射光及周围的漫射强度的观测, 来推算大气气溶胶的光学厚度, 粒径体积分布, 单次反照率, 折射率, 相函数, 直射和散射能量分布等光学特性。最小视角 3° 滤光片半波宽度 (HWB) 为 10nm, 截止阈值 $\leq 0.1\%$ 。

根据事先制订的观察策略观测, 仪器依据一定的观测规则来得到测量数据, 然后自动存储到文本文件中, 我们通过运行日本东京大学开发的 SKYRAD 反演软件包来得到各个波段的光学厚度, 单次散射反照率, 粒径体积谱分布, 相函数和, 折射率。Fig.2 操作方式流程图。



图二

Fig.2 操作方式

3.2 气溶胶光学参数的反演方法

3.2.1 气溶胶光学厚度

由于水汽分子对红外辐射的强烈吸收，选取不处于水汽主要吸收带的400nm, 500nm, 675nm, 870nm, 1020nm等几个波段的辐射资料进行处理。在这些波段对太阳辐射造成衰减的主要因子是大气分子散射、臭氧吸收以及大气气溶胶的散射和吸收。

总大气光学厚度可由三部分组成：瑞利散射光学厚度 $\tau_R(\lambda)$ 、气体吸收光学厚度 $\tau_g(\lambda)$ 和气溶胶学厚度 $\tau_a(\lambda)$ ，如果大气总光学厚度为 $\tau(\lambda)$ ，其计算

$$\tau(\lambda) = \tau_R(\lambda) + \tau_a(\lambda) + \tau_g(\lambda) \quad (7)$$

从总的大气光学厚度当中获取气溶胶光学厚度，必须除去瑞利散射光学厚度 $\tau_R(\lambda)$ 和气体吸收光学厚度 $\tau_g(\lambda)$ 。

1 大气总光学厚度的计算：

由 Bee-Bouguer-Lambert^[38]定律可知，地面上接收到的单色太阳直射光通量密度可以表示为：

$$F = F_0 \exp(-m_0 \tau(\lambda)) \quad (8)$$

通过线性变换，由上式可以变为：

$$V = V_0 \exp(-m_0 \tau(\lambda)) \quad (9)$$

其中： F_0 为大气层顶的辐射通量密度， τ 为大气总的光学厚度， m_0 为大气质量数，当天顶角 $\theta \leq 75^\circ$ 时， $m_0 = \cos^{-1} \theta$ ， θ 为天顶角。 V, V_0 是 F, F_0 对应的电压。大气质量数 m_0 是太阳光自 θ 角入射与自天顶（ $\theta = 0$ ）处入射时整层大气光学厚度的比值，即 $m_0 = \frac{\tau_\lambda(\theta)}{\tau_\lambda(\theta = 0)}$ ，它表示太阳光斜射经过的路程比直射路程大多少倍。

2 瑞丽散射的光学厚度的计算：

瑞丽散射光学厚度是个相对稳定的量，可以根据大气的压力近似的计算出来。其计算公式为：

$$\tau_R = \frac{P}{P_0} \times (a + bH) \lambda^{-(c+d\lambda+e/\lambda)} \quad (10)$$

P 为当时的大气压， P_0 为标准大气压， λ 为波长， H 是海拔（Km）， $a=0.00864$ ， $b=6.5 \times 10^{-6}$ ， $c=3.916$ ， $d=0.074$ ， $e=0.050$ 由于此次数据是在海上测量所以 $H=0$

故上式演变为：

$$\tau_R = \frac{P}{P_0} \times a \lambda^{-(c+d\lambda+e/\lambda)} \quad (11)$$

3 对于气体吸收的气溶胶光学厚度的计算

在仪器规定波段内，气体吸收主要是臭氧（ O_3 ），所以可以根据以下的公式算出气体吸收的光学厚度（Gordon, 1995^[39]）。

$$\tau_g(\lambda) = ck / 1000 \quad (12)$$

k 是臭氧吸收的系数， c 大气中臭氧含量，从NASA网站提供的全球臭氧测绘光谱仪TOMS的遥感数据可获得它在各个地区上空的臭氧含量的测量值，其单位为DU

3.2.2 单次散射反照率的计算

根据RTE(Radiativetransfer equation)方程，天空散射辐射通量密度可以表示为：

$$E(\theta_0, \phi) \equiv E(\Theta) = Fm_0 \Delta\Omega [\omega\tau P(\Theta) + q(\Theta)] \quad (13)$$

其中 ω 为单次散射反照率 (Single scattering Albedo, 以下简称为 SSA), 是散射光学厚度与总光学厚度的比值, 反映了粒子的散射能力; $P(\Theta)$ 为散射角为 Θ 时的总散射相函数; $q(\Theta)$ 表示多次散射 (MS) 的贡献; $\Delta\Omega$ 为仪器的视场角, τ 为大气光学厚度。散射角 Θ 与太阳天顶角 θ_0 、太阳方位角 ϕ_0 以及观测高度角 θ 、观测时的方位角 ϕ 有关, 表示为

$$\cos \Theta = \cos^2 \theta_0 + \sin^2 \theta_0 \cos(\phi - \phi_0) \quad (14)$$

利用观测的太阳直接辐射通量对散射辐射通量进行归一化处理, 得到单色光散射通量辐射率

$$R(\Theta) = \frac{E(\Theta)}{Fm_0 \Delta\Omega} = \omega\tau P(\Theta) + q(\Theta) = \beta(\Theta) + q(\Theta) \quad (15)$$

Nakajima 指出在辐射传输过程中, 多次散射的贡献不容忽视, 而且随散射角 Θ 的增大多次散射的贡献是加大的, 因此在辐射传输方案中采用 Nakajima 与 Tanaka 提出的基于平面平行大气的改进的多次散射辐射方案 (IMS—improved multiple scattering)。

单次散射反照率 (ω_a) 为气溶胶散射光学厚度与气溶胶光学厚度的比值, 反映了气溶胶粒子的散射辐射的能力。

根据 Mie_theory^[40] 理论, 大气气溶胶光学厚度定义为:

$$\tau_a = \int_{r_m}^{r_M} \pi r^2 Q_{ext}(x, \tilde{m}) n(r) dr \quad (16)$$

上式中 r_m, r_M 分布是气溶胶半径的最小值和最大值, x 为尺度参数, $x = \frac{2\pi r}{\lambda}$

$n(r)$ 大气柱中气溶胶的粒子数浓度, $\tilde{m}$ 为气溶胶复折射率系数, $\tilde{m} = m - ki$,

Q_{ext} 为球形粒子 Mie 消光效率因子, 定义为:

$$Q_{ext}(x, \tilde{m}) = \frac{\sigma_{ext}}{\pi r^2} = \frac{2}{x^2} \sum_n R_n (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (17)$$

上式中的消光效率因子 $Q_{ext}(x, \tilde{m})$, 替换为散射效率因子 $Q_{sca}(x, \tilde{m})$, 可以得到气溶胶散射光学厚度 τ_{as} 。

散射效率因子定义为:

$$Q_{ext}(x, \tilde{m}) = \frac{\sigma_{ext}}{\pi r^2} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (18)$$

由 $\omega_a = \tau_{as} / \tau_a$ 可以求出单次反照率。 τ_a 为一般取 0.5um 处得气溶胶厚度。

该厚度常作为大气浊度的参考值。

3.2.3 气溶胶粒度分布体积谱

利用太阳消光光谱测量可以获取气溶胶粒子尺度分布,方法是测量直射太阳光束的消光并获得多个波长的大气气溶胶光学厚度,这种消光光谱中含有反演粒子尺度分布的权重信息。

大气柱气溶胶体积谱^[41] $v(r)$ 表示空气柱单位截面的气溶胶体积,定义如下:

$$v(r) = dV / d \ln r \quad (19)$$

根据Mie 散射理论,大气气溶胶光学厚度定义为:

$$\begin{aligned} \tau_a &= \int_{r_m}^{r_M} \pi r^2 Q_{ext}(x, \tilde{m}) n(r) dr \\ &= 2\pi / \lambda \int_{r_m}^{r_M} k_{ext}(x, \tilde{m}) v(r) d \ln r \end{aligned} \quad (20)$$

(20) 式中,气溶胶分布体积谱 $v(r)$ 与气溶数浓度谱分布 $n(r)$ 的关系为:

$$v(r) = (4\pi / 3) r^4 n(r) \quad (21)$$

我们把 $k_{ext}(x, \tilde{m})$ 称为消光光谱法中反演气溶胶尺度谱的核函数 (Kernel Function)

$$k_{ext}(x, \tilde{m}) = \frac{3}{4} \frac{Q_{ext}(x, \tilde{m})}{x} \quad (22)$$

r_M , r_m 气溶胶尺度分布的最大,最小半径。如果测量得到一系列波长上的气溶胶光学厚度,求解(20)式可以反演到气溶胶粒度分布体积谱。

3.2.4 气溶胶相函数

根据 Mie 散射理论,气溶胶散射相函数^[42] 定义为 :

$$P_A(\Theta) = \beta_A(\Theta) / \omega_A \tau_A \quad (23)$$

其中, $\beta_A(\Theta)$ 为整个大气的气溶胶散射系数, ω_A 为单次反照率, τ_A 为气溶胶光学厚度。

而整个大气气溶胶微分散射系数 $\beta_A(\Theta)$ 定义为:

$$\begin{aligned} \beta_A(\Theta) &= \frac{\lambda^2}{2\pi} \int_{r_m}^{r_M} [i_1(\Theta, x, \tilde{m}) + i_2(\Theta, x, \tilde{m})] n(r) dr \\ &= 2\pi \int_{r_m}^{r_M} k(\Theta, x, \tilde{m}) v(r) d \ln r \end{aligned} \quad (24)$$

其中 i_1, i_2 为 Mie 强度函数, $n(r)$ 气溶胶粒度分布谱。

我们把 $k(\Theta, x, \tilde{m})$ 称为微分散射系数的核函数 (Kernel Function)。

$$k(\Theta, x, \tilde{m}) = (3/2) \frac{i_1 + i_2}{x^3} \quad (25)$$

$n(r)$, $v(r)$ 分别为气溶胶粒度分布谱和气溶胶粒度分布体积谱。

$n(r)$ 表示在一个空气柱截面上气溶胶粒子的个数。

算法流程图:

气溶胶光学参数迭代求解流程由 Fig. 3 给出。图中 $R^{mean}(\lambda_i, \Theta_j)$ 为对散射辐射进行归一化得到的散射辐射率; $\Lambda(\lambda_i)$ 为地表反射率, $\tau(\lambda_i)$ 为光学厚度; Θ_j 为散射角; θ_0 为太阳高度角; r_m , r_M 分别为粒子的最小、最大半径; $\tilde{m}(\lambda_i)$ 为气溶胶粒子的复折射率指数; $v(r)$ 为气溶胶粒子体积谱; $P_a(\lambda_i, \Theta_j)$ 为散射相函数; ε_j^n 为第 j 个散射角第 n 次迭代余差。

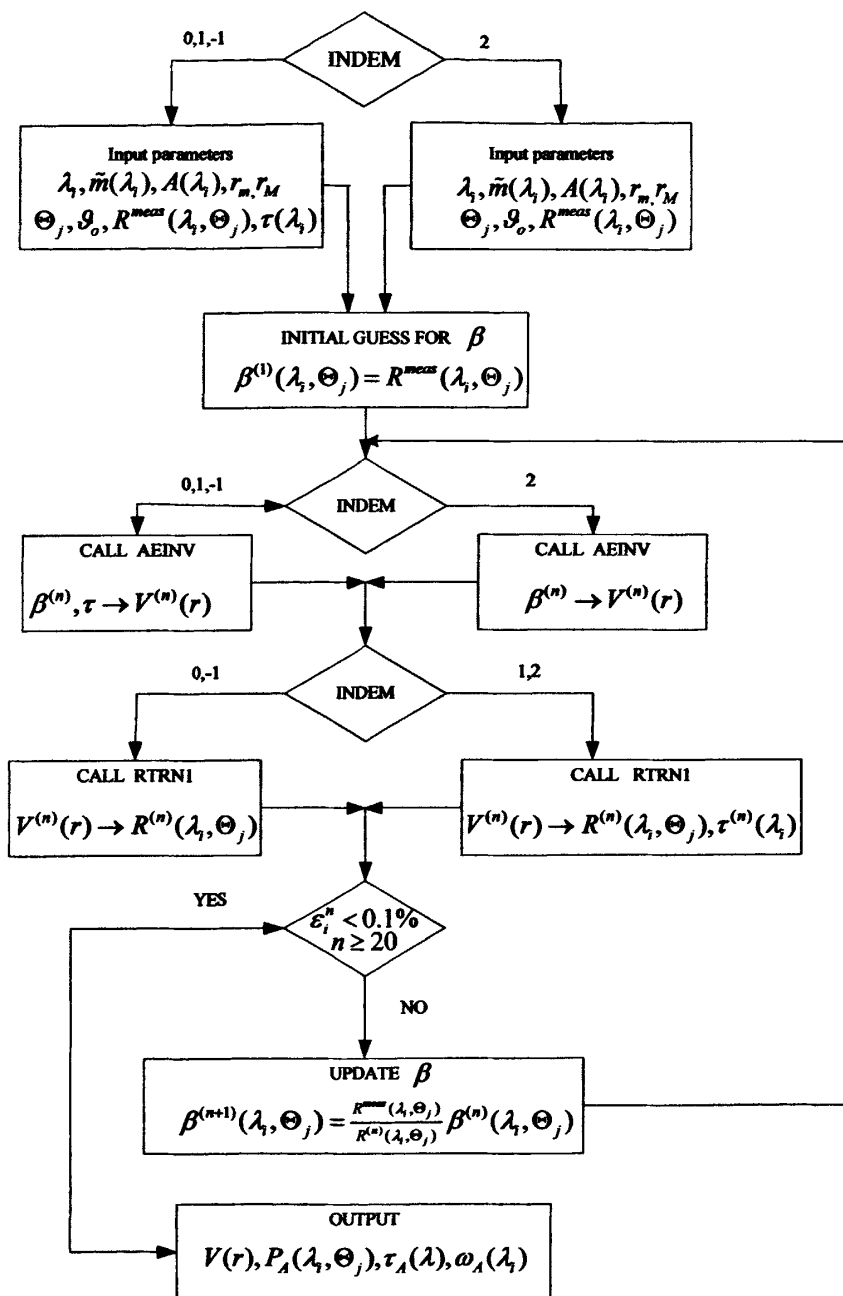


Fig.3 算法流程图

根据以上数据处理原理和方法, 日本东京大学开发了 SKYRAD 反演程序包, 用于处理天空辐射计的海上观测资料。本文采用的是最新的 4.2 版的 SKYRAD 反演程序包。日本 PREDE 公司生产的 POM-01MKII 型 7 波段天空辐射计, 曾经搭载于 NOAA 的 Ron Brown 科学考察船上, 在 ACE-Asia 期间与其它两种手持太阳光度计 MicroTops 和 SIMBAD 观测结果进行了对比, 观测结果一致性较好^[43]。

3.3 仪器反演结果的交互印证

对陆地观测,我们将安装在同一地点的 POM-01MK2 天空辐射计与 PREDE 公司 POM-02L 天空辐射计的反演结果进行了对比印证。

用于比较的数据来源:

(1) PREDE Skyradiometer POM-02L, 安装地点: 中国海洋大学鱼山校区八关山, 数据以 Sheng 表示;

(2) PREDE Skyradiometer POM-01MKII, 安装地点: 中国海洋大学鱼山校区逸夫科技馆五楼顶, 数据以 Chen 表示。

用于比较的数据集: 2006 年 4 月至 11 月, 两台仪器有共同观测的日期, 共 73 天。

比较印证结果如下:

- 按月份分别比较两台仪器测量的 500nm 气溶胶光学厚度, 分别如图 1.1-1.8 所示。其中横坐标值为: 观测日期(日)+观测时间(小时)/24。

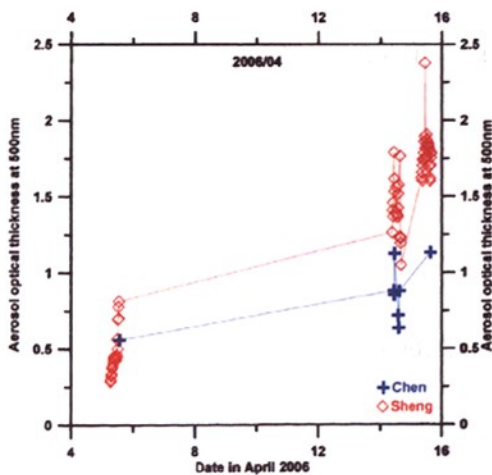


图 1.1 2006 年 4 月

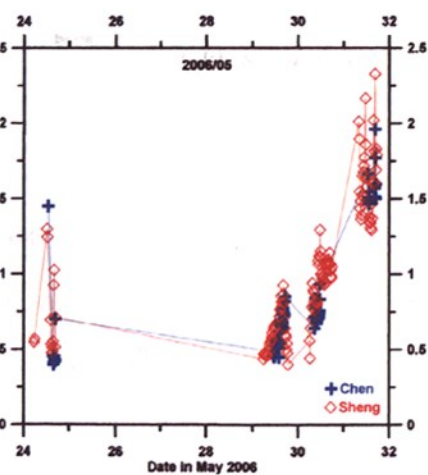


图 1.2 2006 年 5 月

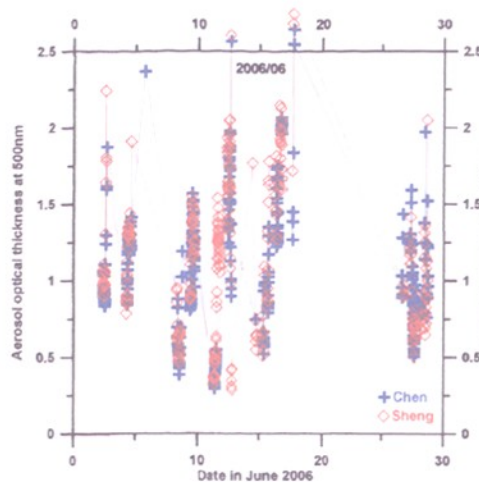


图 1.1 2006 年 6 月

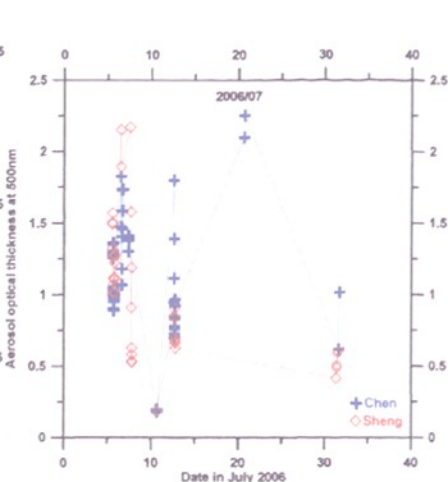


图 1.2 2006 年 7 月

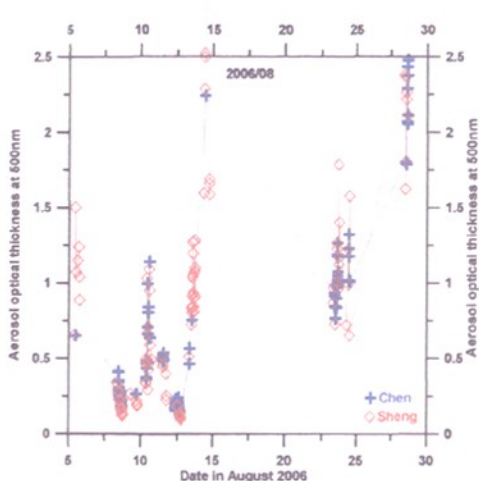


图 1.1 2006 年 8 月

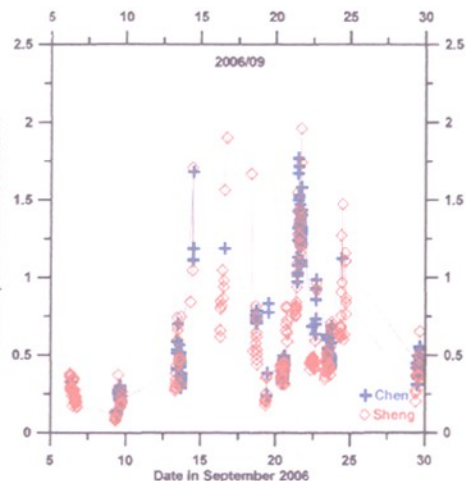


图 1.2 2006 年 9 月

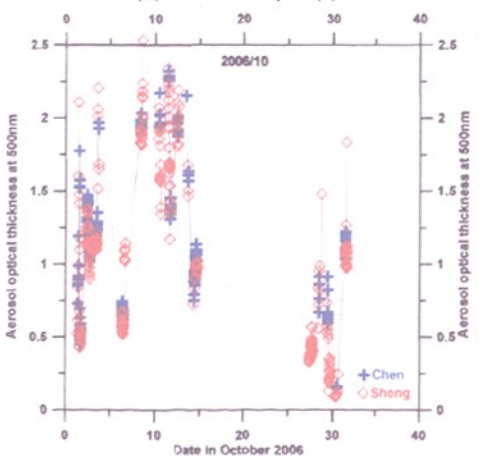


图 1.1 2006 年 10 月

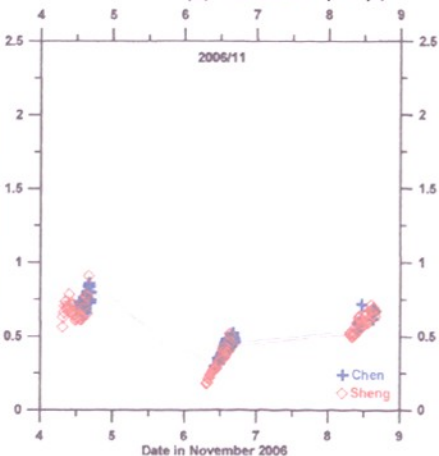
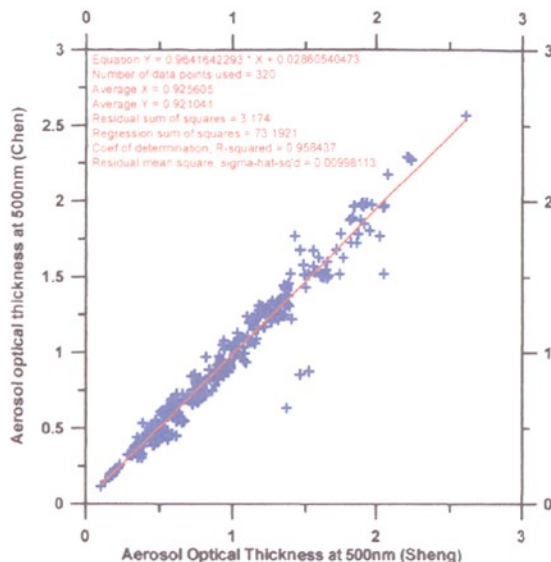


图 1.2 2006 年 11 月

2. 同步匹配比较

以 POM-02L (Sheng) 的观测时间为基准, 寻找出 POM-01MKII (Chen) 的观测时间中与 Sheng 的观测时间前后相差不超过 3 分钟的观测值进行匹配。匹配结果如图 2 所示:



可见, 两台仪器的观测结果之间具有良好的一致性。

3. 4 数据资料的介绍

本文使用的现场测量数据由三部分组成, 中国 SOLAS 2006 春季黄海航次, 2006 冬季 908 北黄海航次, 2007 秋季 908 北黄海航次。

在各个航次的出海期间采用统一的观测时间, 即: 从早上 07: 00 开始到下午 17: 00 为止, 两次自动观测时间间隔一般设定为 5 分钟, 也可根据需要随时进行手动加密观测。仪器观测的同时也记录了当时的天气状况。比如湿度、气压、云量、风速风向等气象信息。当有云使阳光不能透射 (太阳辐射强度小于某一仪器设定的阈值) 时, 仪器处于待机状态。Solas 航次北黄海域获取了 2 天的数据, 其中包括 4 个站位信息, 共 45 个记录。冬季 908 航次获取了 15 天的数据, 其中有 21 个站位数据, 共 135 条样本。秋季 908 航次获取了 10 天的数据, 其中有 31 个站位, 共 305 个样本。下图给出了这三个航次北黄海区有数据的观测站位图。

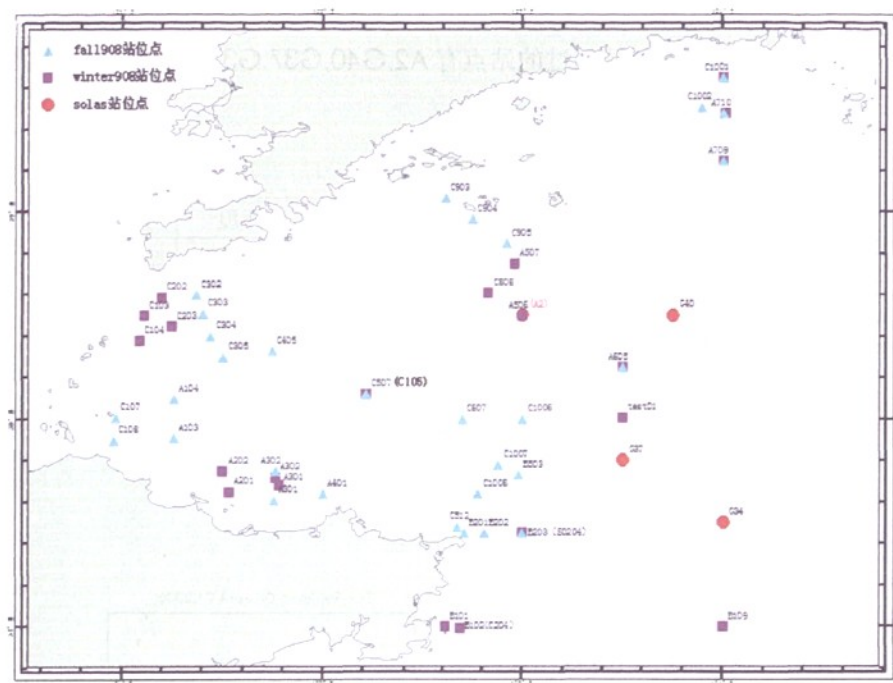


Fig.4 各个航次有数据的站位图

Fig.4 中, 红色是 solas 站位, 紫色是 winter908 站位, 蓝色是 fall908 站位。在这三个航次中, 有些站位是重叠的, 这也为本文后半部分讨论同一站点在不同季节中的气溶胶光学特性的变化的研究提供了基础。

第四章 实验结果分析

4.1 春季北黄海海区 (solas)

中国 Solas (Surface Ocean_lower Atmosphere Study) 计划将亚洲内陆的沙尘气溶胶与海洋生态系统联系起来做为一个互相影响的有机整体进行研究。在这一节中我们选择了 2006 年春季 Solas (4 月 17 日~30 日) 对黄海和东海调查资料中的北黄海数据进行分析研究, 调查船为中国海洋大学的东方红 2 号科考船。观测项目涉及物理海洋, 海洋化学, 海洋生物, 海洋光学等学科的内容。

2006 年春季我国北方的沙尘天气频频影响到我国近海海域, 在这一节中我们看看几个典型站位, 通过分析这几个站位的气溶胶光学特性来研究沙尘对气溶胶光学特性的影响。

根据气象记录 4 月 21 日是天气最为晴朗的好天气, 可以做为背景天气, 用

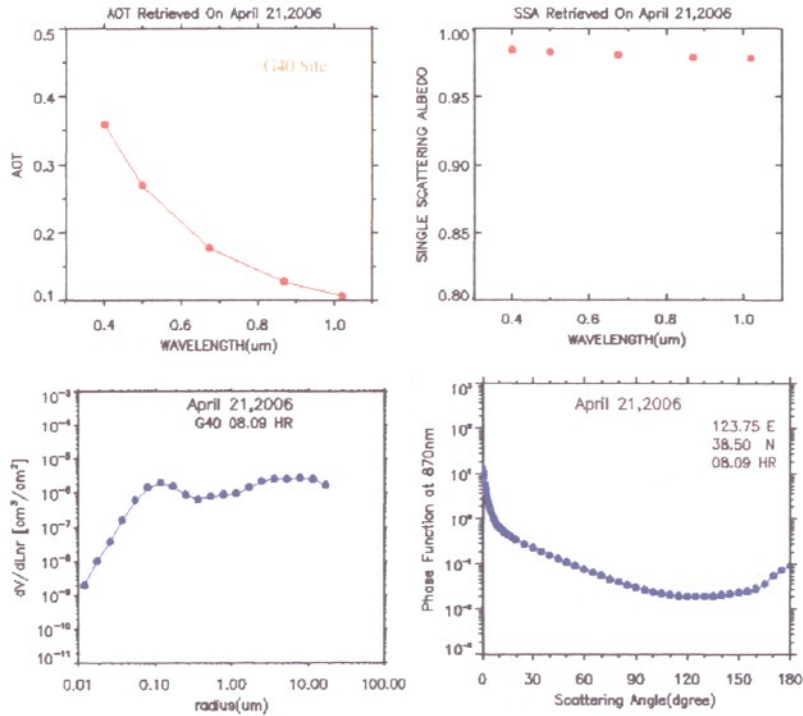
于和有云或者雾情况下的气溶胶做个对比。19 日在观测时间段内属于晴天微尘天气。这个航次在北黄海海域经过的站点有 A2,G40,G37,G3 四个站位。可以参考 fig.4。各个站位的天气信息见下表。

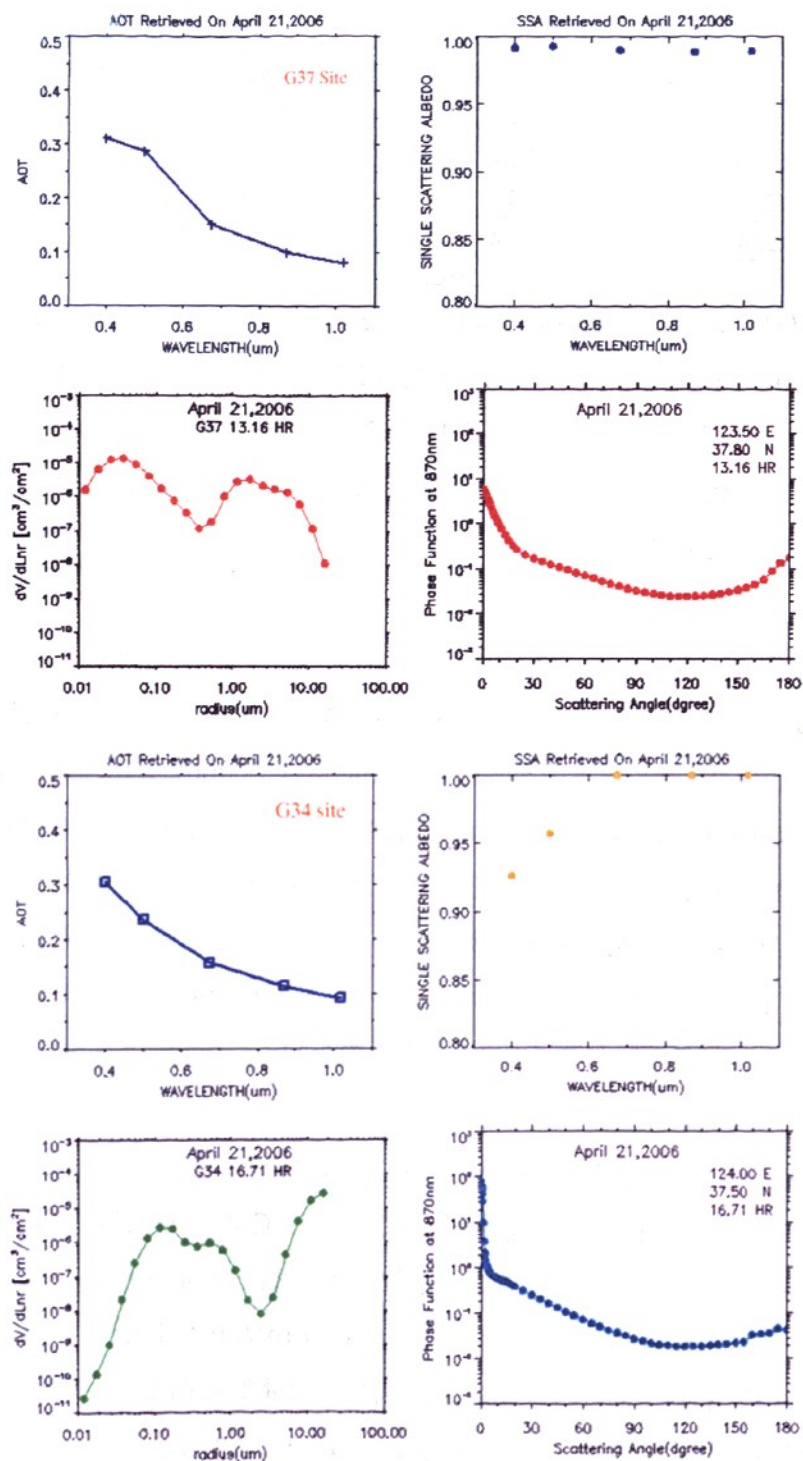
日期	站位	时间（北京时）	经度	纬度	天气记录
2006-04-19	A2	12.19	123.00	38.50	晴天，浮尘
2006-04-21	G40	08.09	123.75	38.50	晴天，无云
2006-04-21	G37	13.16	123.50	37.80	晴天，无云
2006-04-21	G34	16.71	124.00	37.50	晴天，无云

Table.1

C

(a)晴天，浮尘





(b)海洋背景气溶胶

a)气溶胶光学厚度 b)单次散射反照率 c) 粒径体积谱 d) 相函数

fig.5 各站位观测结果图

4.1.1 气溶胶光学厚度

	400nm	500nm	675nm	870nm	1020nm
A2	0.55	0.46	0.31	0.22	0.18
G40	0.36	0.27	0.18	0.13	0.11
G37	0.31	0.29	0.15	0.10	0.08
G34	0.31	0.24	0.16	0.11	0.09

Table.2

A2 站位根据气象记录该时间段内属于晴天浮尘天气,该站位的气溶胶光学厚度在 500nm 的值为 0.46,在 870nm 为 0.22,其它站位的值在 500nm 处都小于 0.3,在 870nm 处的值都小于 0.15,A2 站位的各个波段的气溶胶光学厚度的值差不多是他站位对应波长气溶胶光学厚度的两倍,可见微弱的浮尘天气对太阳辐射有较强的削弱作用。

4.1.2 气溶胶单次反照率

从单次散射反照率来看,A2,G34 站位在所测波长的的位置出现了吸收的情况.其中 A2 站位在 500nm 处的吸收较强,达到了 0.8 左右,在 870nm 处也达到了 0.95,说明沙尘对单次反照率的影响很大。G34 站位 500nm 处出现了弱吸收 ($0.95 < ssa < 0.98$) 的情况,,而在 870nm 处 SSA 接近于 1,说明该区域上空的大气受到了来自陆源物质的影响,但该物质对于 870nm 处的光基本不吸收。G37,G40 站位各个波长处的 ssa 都接近于 1,即体现了强散射($ssa > 0.98$) ,该区域上空基本上是干洁的空气,未受陆地源的影响。A2 和 G34 所处的位置离陆地较远,可见陆地源气溶胶对海洋上空的影响不容小觑。

4.1.3 气溶胶粒径体积谱

从粒径体积谱分布来看,A2 站位的小粒子含量较少,同温层气溶胶,海盐粒子,粗粒子的含量相当的高,都达到了 10^{-6} 以上。G40 站位同温层气溶胶粒子,海盐粒子,粗粒子的含量相对于小粒子而言高,但是其值却不到 $10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 。G37 站位,聚类粒子含量达到了 $10^{-5} \text{ cm}^3/\text{cm}^2$,要大于同温层气溶胶,海盐粒子,粗粒子的含量。G34 站位大粒子含量要大于同温层气溶胶,海盐粒子的含量。从上面可知,在有浮尘的天气情况下,北黄海海区上空的气溶胶粒子包括同温层气溶胶,海盐粒子,粗粒子的含量都很高,在晴好天气的情况下,只要大粒子的含量增加了,一般是受到陆地源的污染的影响,同时也使得的单次散射反照率 出现了弱吸收的情况。可见粗粒子的含量对单次散射反照率是有很

大的影响的。

4.1.4 气溶胶粒子相函数

从四个站位的相函数来看，都是前向散射大于后向散射，有浮尘天气的站位的相函数中大约在 $120\sim 180$ 度散射角的范围内相函数基本上是水平的，达到了极小值。海洋背景下的气溶胶的相函数中，G34 站位，前向散射能量要大于其它站位的前向散射能量一个数量级。后向散射在没有出现吸收的情况下， $150\sim 180$ 之间有个极小值和极大值出现。

4.1.5 小结

(1) 我国北黄海海区在晴天（背景）的情况下，气溶胶光学厚度 500nm 处的值接近于均值 0.26, 这个结论与申彦波等人对该地区研究的结果相近, 在 870nm 处的值接近 0.1。在少量浮尘情况下, 气溶胶光光学厚度 500nm 接近 0.5, 870nm 处的值大于 0.2。

(2) 从地理位置来看，这几个站位离陆地比较远，而这些站位出现了弱吸收的情况，究其原因是大气中含有陆地污染源的气溶胶粒子。由此可见海域上空的气溶胶的散射特性也会受到来自于其它地方的物质的影响。

(3) 粒径体积谱分析中得知，粗粒子，海盐粒子，同温层粒子含量的同时增大对北黄海海域上空气溶胶光学厚度变大有很大的贡献。聚类粒子的含量的多少对气溶胶光学厚度的变大也起着一定的作用。

(4) 相函数来看，强的前向散射比较明显，不同的是后向散射在晴天无云情况下在散射角 $150\sim 180$ 度 之间有个极小值和极大值。有浮尘的情况下散射角 $150\sim 180$ 度之间 却是水平的。从这层意义来看，我们也可以判断出浮尘对大气传输的削弱的作用。

4.2 冬季北黄海海区(winter908)

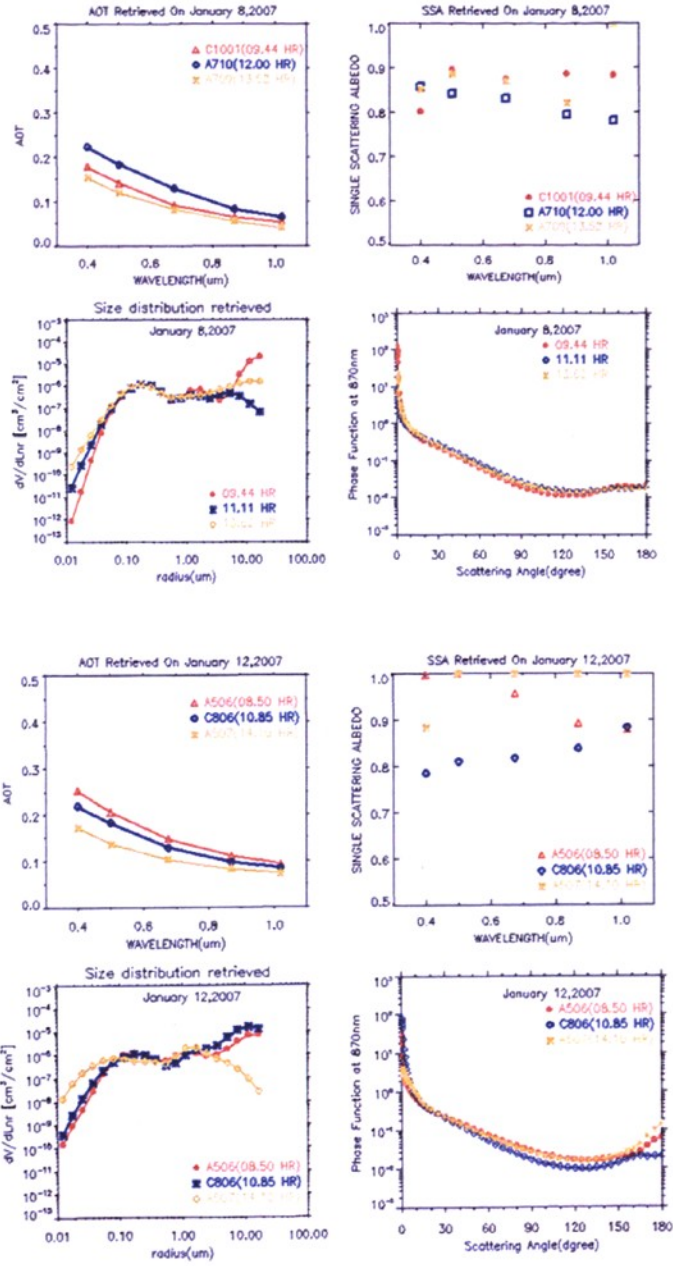
2006 年 12 月 31 日~2007 年 1 月 16 日, 中国海洋大学组织了 winter908 航次, 目的是为了获取我国北黄海海区 ($121.00\text{E} \sim 124.00\text{E}$, $37.00\text{N} \sim 39.75\text{N}$) 海洋光学数据。此次出海我们使用船载 7 波段天空辐射计 (POM-01 MarkII) 获取的大量的真实可靠的船基数据, 本节就以这些数据为基础来, 分析一些典型站位的大气气溶胶光学厚度 (AOT)、单次散射反照率 (SSA)、粒径体积谱、相函数的特点, 进而对冬季的北黄海海区上空的气溶胶光学特性进行研究。

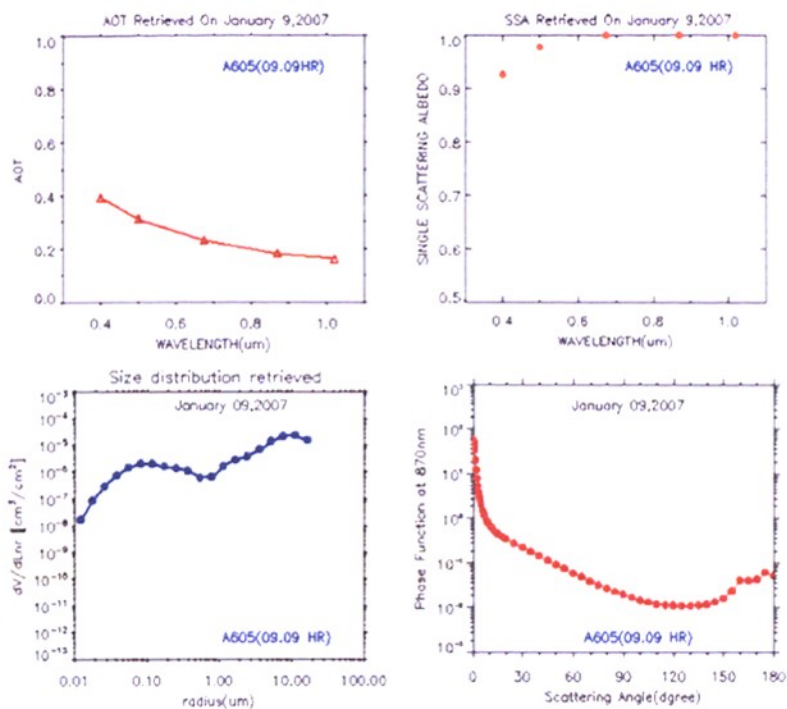
由于是冬季，在北黄海水区常常会有大雾，多云的情况，所以本节把站位分为晴天无云，有雾，多云，阴霾四个部分，分别分析在这几种情况下的，气溶胶光学厚度，单次散射反照率，粒径体积谱，和相函数的特性。

站位信息如下表：

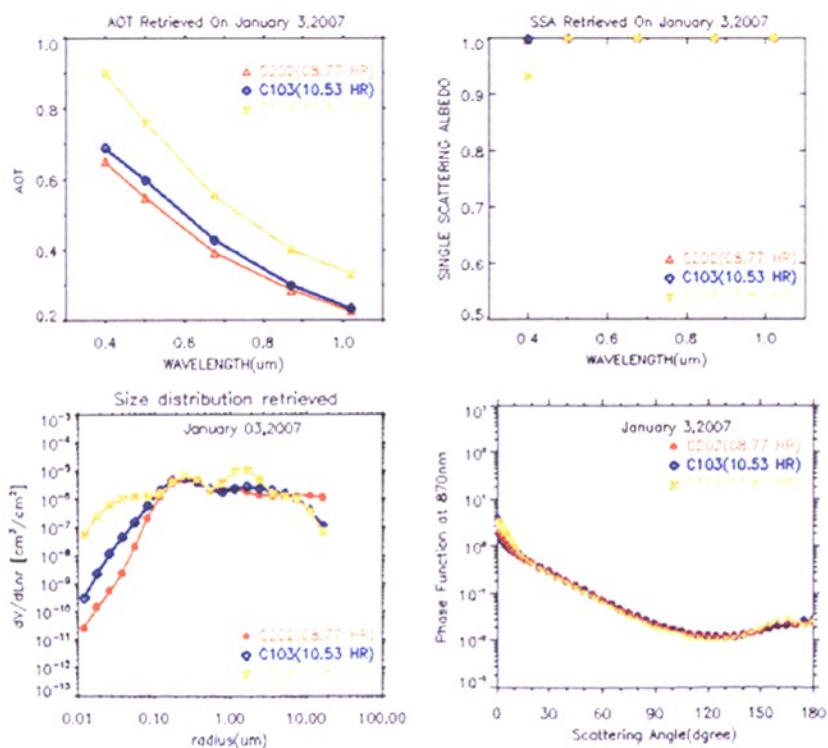
日期	站位	时间	经度	纬度	天气情况
2006-12-31	test01	13.84	123.50	38.01	晴，有雾
2007-01-03	C202	08.77	121.20	38.59	晴，有雾
2007-01-03	C103	10.53	121.11	38.50	晴，有雾
2007-01-03	C104	11.80	121.09	38.38	晴，有雾
2007-01-04	A202	08.77	121.50	37.75	晴，有雾
2007-01-04	A201	11.43	121.53	37.65	晴，有雾
2007-01-04	A301	13.83	121.78	37.68	多云
2007-01-04	A302	14.08	121.76	37.72	多云
2007-01-08	C1001	09.44	124.00	39.66	晴朗 无云
2007-01-08	A710	12.00	124.01	39.48	晴朗 无云
2007-01-08	A709	13.52	124.00	39.25	晴朗 无云
2007-01-09	A605	09.09	123.50	38.25	晴朗 无云
2007-01-10	B109	12.42	124.00	37.00	多云，阴
2007-01-11	B203	11.62	123.03	37.45	大雾，阴
2007-01-12	A506	08.50	123.00	38.49	晴，无云
2007-01-12	C806	10.85	122.83	38.61	晴，无云
2007-01-12	A507	14.10	122.96	38.75	晴，无云
2007-01-15	C203	12.70	121.25	38.45	太阳暗淡，阴霾
2007-01-16	B102	12.89	122.69	36.99	太阳暗淡，阴霾
2007-01-16	B101	13.31	122.61	37.00	太阳暗淡，阴霾

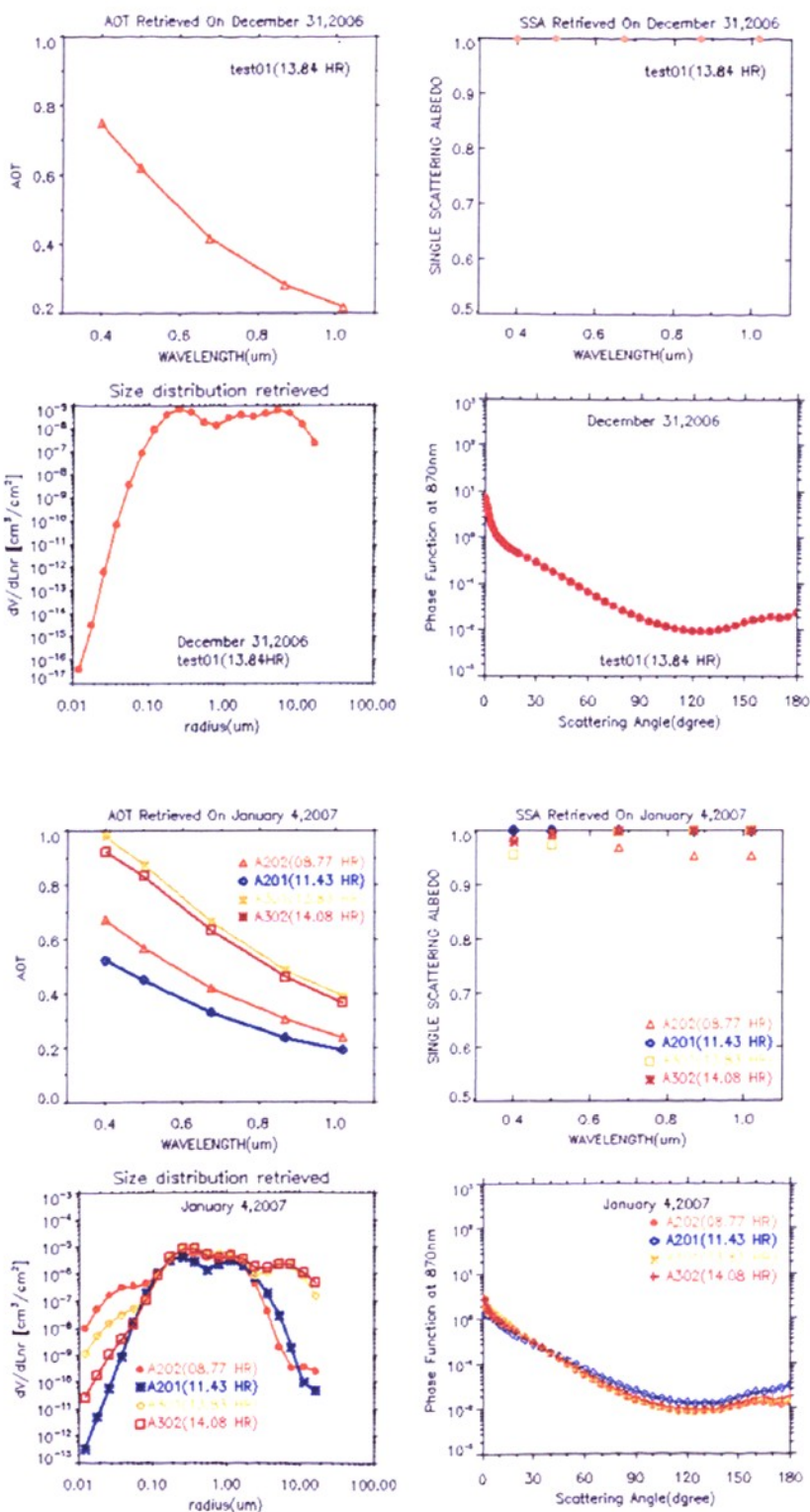
Table.3

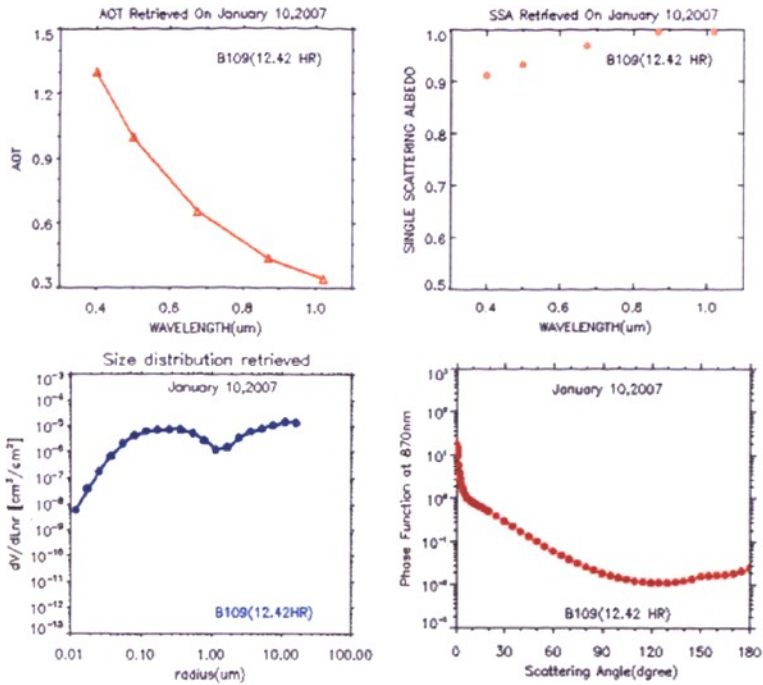




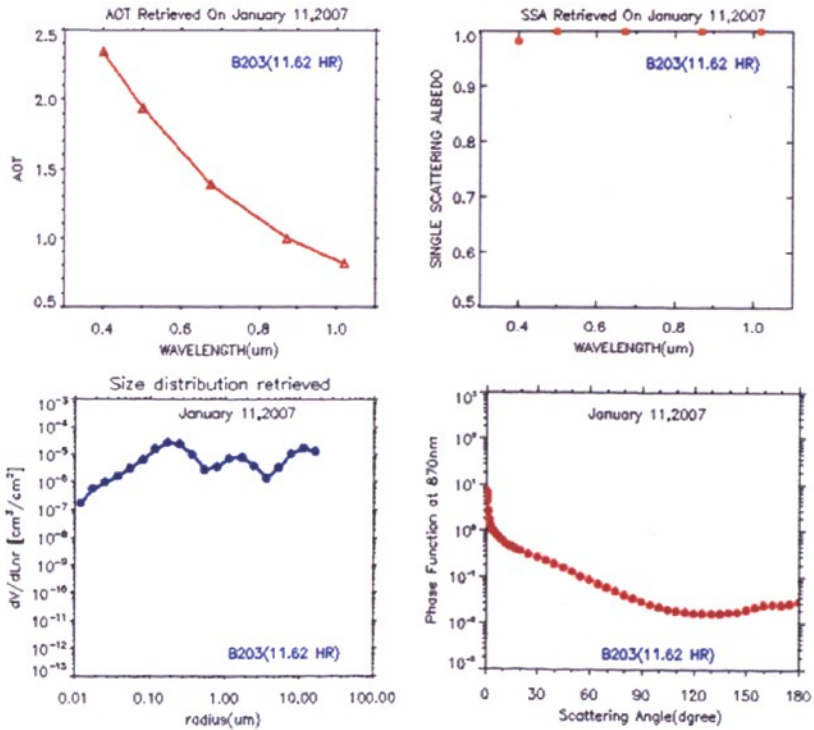
(a) 晴天 无云 (海洋型背景气溶胶)



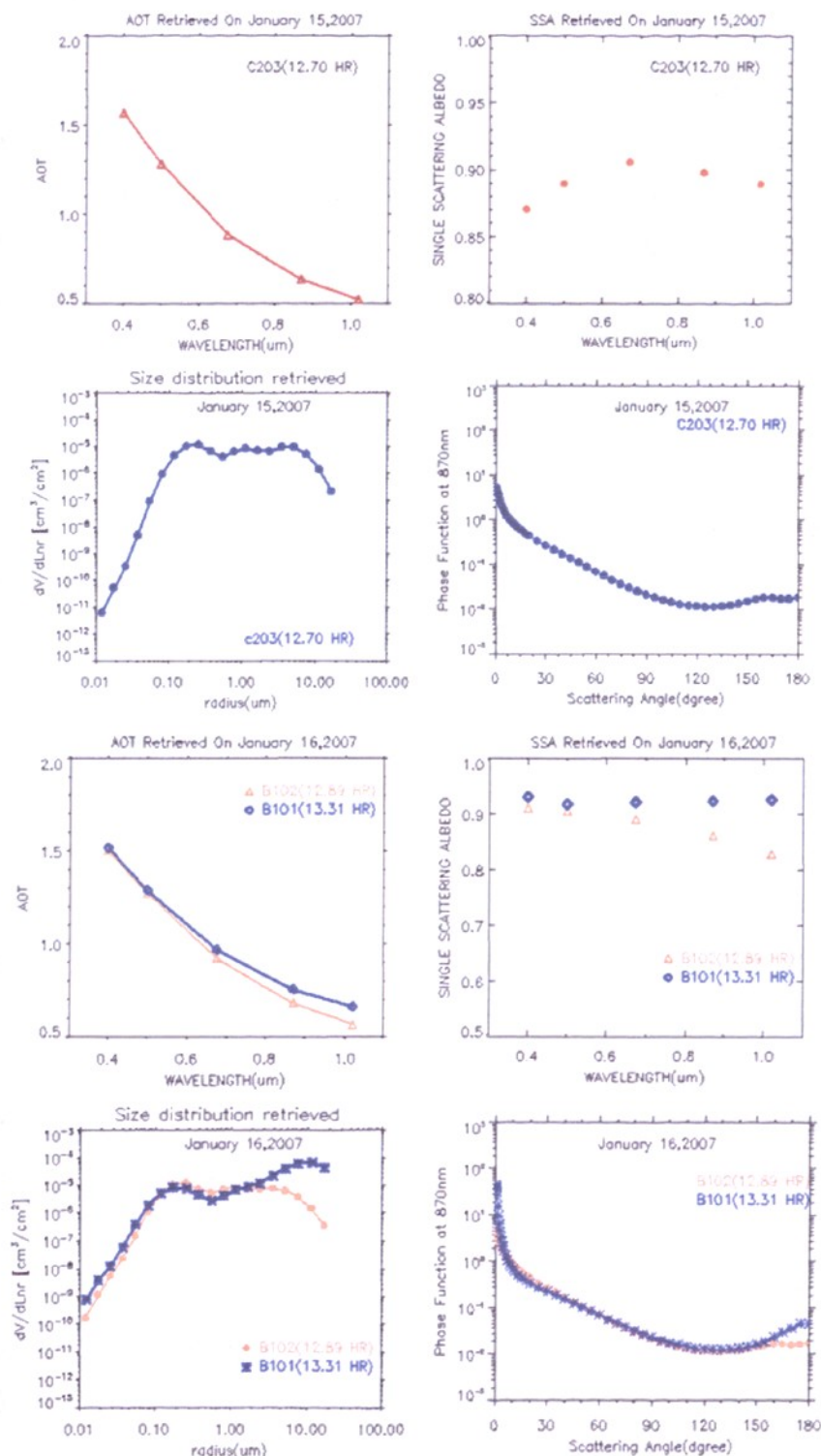




(b) 晴, 有雾



(c) 阴天, 大雾



(d) 阴霾

a)气溶胶光学厚度 b)单次散射反照率 c) 粒径体积谱 d) 相函数

Fig.6 winter908 观测结果

4.2.1 气溶胶光学厚度

图(a)所示,在晴天无云情况下 500nm 处 AOT 值小于 0.25, 870nm 处 AOT 值小于 0.2,图(b)所示,晴天有雾情况下 500nm 的 AOT 在 0.46 到 1.0 之间,870nm 处 0.28~0.5 之间。图(c)阴天大雾的 AOT_500nm 达到了 2.0, AOT_870 为 1.0,图(d)阴霾的 AOT_500nm 的值在 1.3 附近, AOT_870nm 的值小于 0.8。可见晴天无云的气溶胶光学厚度最小,阴天的有雾最大,再次说明雾和云对气溶胶散射削弱很大。

4.2.2 气溶胶单次反照率

海洋背景气溶胶情况下图(a) 基本都存在较强的吸收性,如站位 C1001, A710, A709, C806, A506,特点是相对来讲离岸比较近,气溶胶吸收型比较强。A507, A605, 离岸相对较远,受到影响比较小。由于冬季的北方受到煤烟等物质的影响,导致离岸近的海域上空出现了强吸收的情况。晴天有雾和阴天有雾的情况,各个站位上空的 SSA 出现较强的散射性,阴霾天气下的气溶胶的吸收型也比较强,可能是湿度大,把空气中的小粒子聚合成了大的粒子,这些大的粒子中含有一些吸收型的物质。这些吸收型的物质可能来源于陆地。如站位: B101,B102,C203。

4.2.3 气溶胶粒径体积谱

从粒径体积谱来看,阴霾,有雾和多云的情况下粒子的分布与晴天无云的情况下相差比较大。晴天的气溶胶体积谱在尺度为 $1\mu\text{m}$ 处的值接近于 $10^{-7}\text{cm}^3/\text{cm}^2$,晴天有雾的情况下,超过 $10^{-6}\text{cm}^3/\text{cm}^2$,接近于 $10^{-5}\text{cm}^3/\text{cm}^2$,阴天有雾,阴霾天气同温层气溶胶粒子超过了 $10^{-5}\text{cm}^3/\text{cm}^2$,粗粒子的含量也达到了 $10^{-5}\text{cm}^3/\text{cm}^2$,其体积远大于了晴天时候的体积。可见气溶胶光学厚度的增加,相应的体积谱的值也在变大。

4.2.4 气溶胶粒子相函数

在晴天海洋背景下的气溶胶粒子的后向散射大于有雾或阴霾情况下的。有雾或阴霾天气时在散射角为 $150\sim 180$ 度之间,相函数出现水平说明在改散射角范围内后向散射能不大。晴天时在在散射角为 $150\sim 180$ 度之间有极大和极小值。

4.2.5 小结

冬天北黄海海区有雾或者阴霾的天气几率很大,在此次出海观测数据中很大一部分遇到的天气是雾天获取的。本节使用的船基数据是 2007 年 1 月份北黄海海区的实测资料,分析该数据我们得出以下结论。

(1) 海洋背景气溶胶的 AOT 在 500nm 处值在 0.2~0.3 之间, 870nm 的值在 0.1~0.2 之间,晴天有雾是 500nm 的值在 1.0 附近, 870nm 的值在 0.4 附近。阴天有雾时气溶胶光学厚度很大, τ_{500} 达到了 1.8, τ_{870} 为 1.0。阴霾天气 τ_{500} 的值在 0.9~1.3 之间, τ_{870} 的值在 0.6~0.8 之间。这个航次中气溶胶光学厚度表明,雾和云对于大气传输的影响很大。

(2) 单次散射反照率来看,这个区域的大气在晴天无云背景下(a)存在很强的吸收,大致呈现离岸近吸收强离岸远吸收弱的趋势。晴天有雾(b)的情况下吸收性比较弱,大气比较干洁。阴霾的天气如图(d)有着较强的吸收,这些站位离陆地比较近,受到了陆源气溶胶的影响很大。

(3) 粒径体积谱在晴天情况下,半径为 1 μm 的粒子在 $10^{-7} \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \sim 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 之间,同温层气溶胶含量要比海盐粒子含量高一个数量级。晴天有雾情况下,半径为 1 μm 的粒子在 $10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \sim 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 粗粒子的含量却有所下降。阴天有雾时同温层气溶胶粒子,海盐粒子,粗粒子含量较高,达到了 10^{-5} 。阴霾天气,离岸近的站位粗粒子含量高达 $10^{-4} \text{ cm}^3/\text{cm}^2$,有下降的趋势,同温层气溶胶粒子和海盐粒子达到了 $10^{-5} \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 左右。

(4) 相函数来看,晴天无云的后向散射明显大于其它情况下的后向散射。在散射角 $0^\circ \sim 150^\circ$ 之间,各种情况的相函数区别不大,在 $150^\circ \sim 180^\circ$ 之间,晴天无云情况下有极大和极小值,其它情况下只有极小值,曲线趋向于水平。

4.3 秋季北黄海海区(fall908)

在 2007 年秋季 908 航次(10 月 14~25 日)的观测期间,我们遇到晴天、多云、有雾、阴天四种天气情况(Table. 4),在此期间,晴天数比较多,达到了 7 天(14, 15, 16, 17, 19, 20, 23 日),多云 1 天(24 日),有雾有 2 天(21, 22 日),阴天有 2 天(18 日, 25 日)。

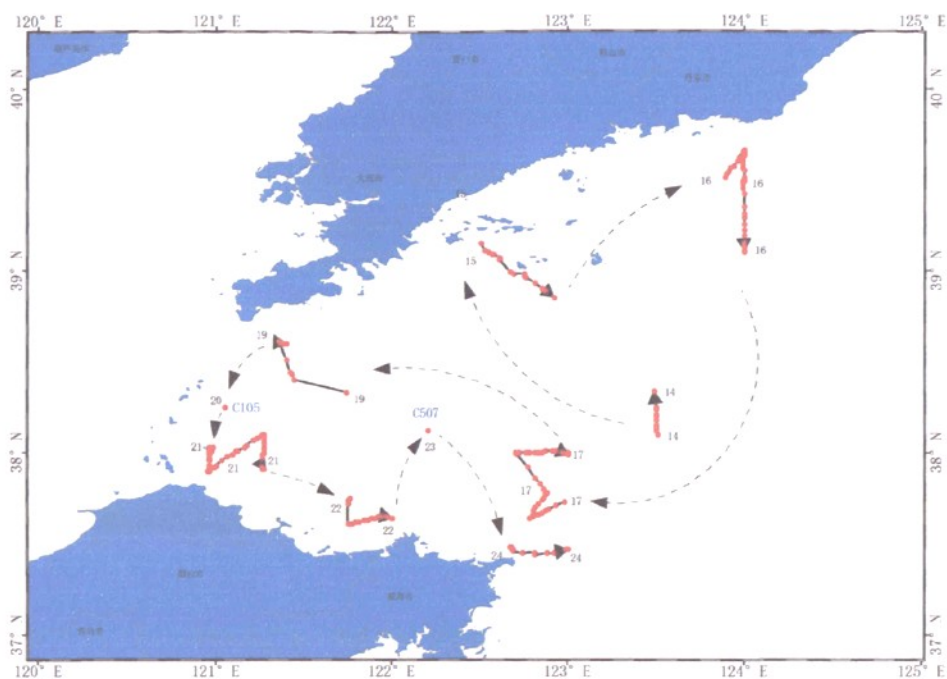


Fig. 7 秋季 908 航次日期方位图

观测日期信息 (2007 年 10 月)			
日期	有无观测	反演结果 (样本数)	气象条件
14	有	11	晴
15	有	19	晴
16	有	51	晴
17	有	48	晴
18	有	0	阴, 多云
19	有	18	晴
20	有	11	晴
21	有	68	雾
22	有	18	雾、阴霾
23	有	41	晴
24	有	22	多云
25	无	0	阴有小雨
合计	307(个)		

Table. 4 2007 年秋季 908 航次期间的天气情况及仪器观测、反演情况

下面利用天空辐射计的观测结果，具体地分析在这几种天气情况下，我国北黄海海区的气溶胶光学特性在秋季里时间变化的特征。在本文中，以两个典型波段 500nm 和 870 nm 为例进行分析。Fig.8 给出了整个航次观测过程中 500nm 和 870nm 两个波段的气溶胶光学厚度随时间变化的曲线。从图中可以看出：这两个波段的气溶胶光学厚度变化范围都比较大。

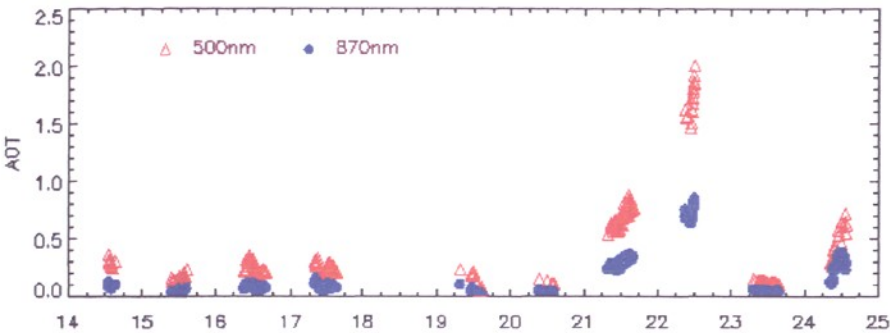


Fig.8

Table.5 给出了对应每一观测日 500nm 和 870nm 两个波段的气溶胶光学厚度的统计分析，包括最小值、最大值和平均值。

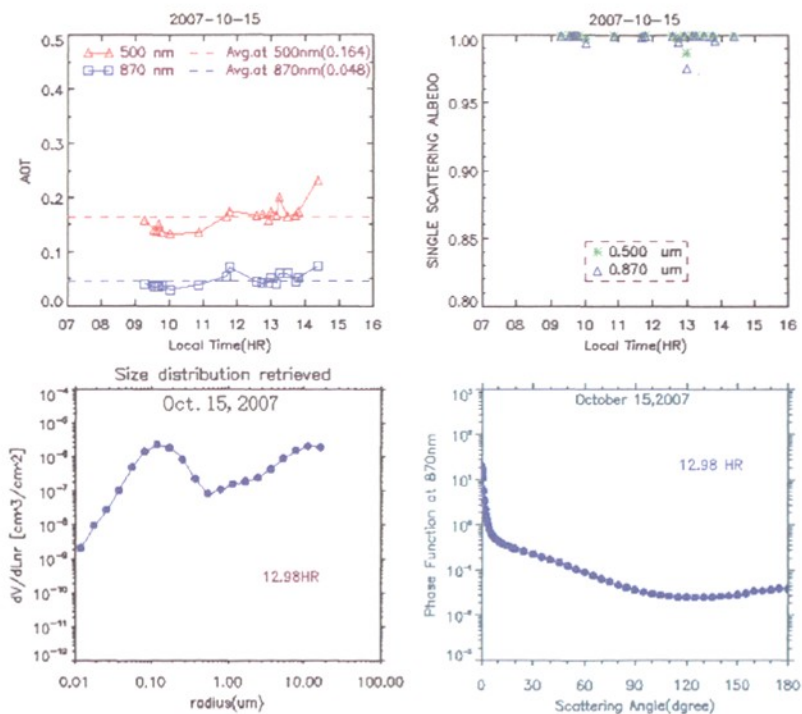
Wavelength OCT.	500nm			870nm		
	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.
14	0.250	0.359	0.286	0.070	0.127	0.090
15	0.134	0.233	0.164	0.030	0.074	0.048
16	0.178	0.355	0.256	0.050	0.116	0.079
17	0.193	0.332	0.245	0.055	0.148	0.083
19	0.057	0.229	0.122	0.015	0.101	0.040
20	0.096	0.144	0.114	0.026	0.053	0.036
21	0.540	0.873	0.686	0.216	0.365	0.286
22	1.464	2.003	1.693	0.629	0.850	0.726
23	0.103	0.144	0.124	0.031	0.060	0.040
24	0.265	0.715	0.438	0.112	0.389	0.226

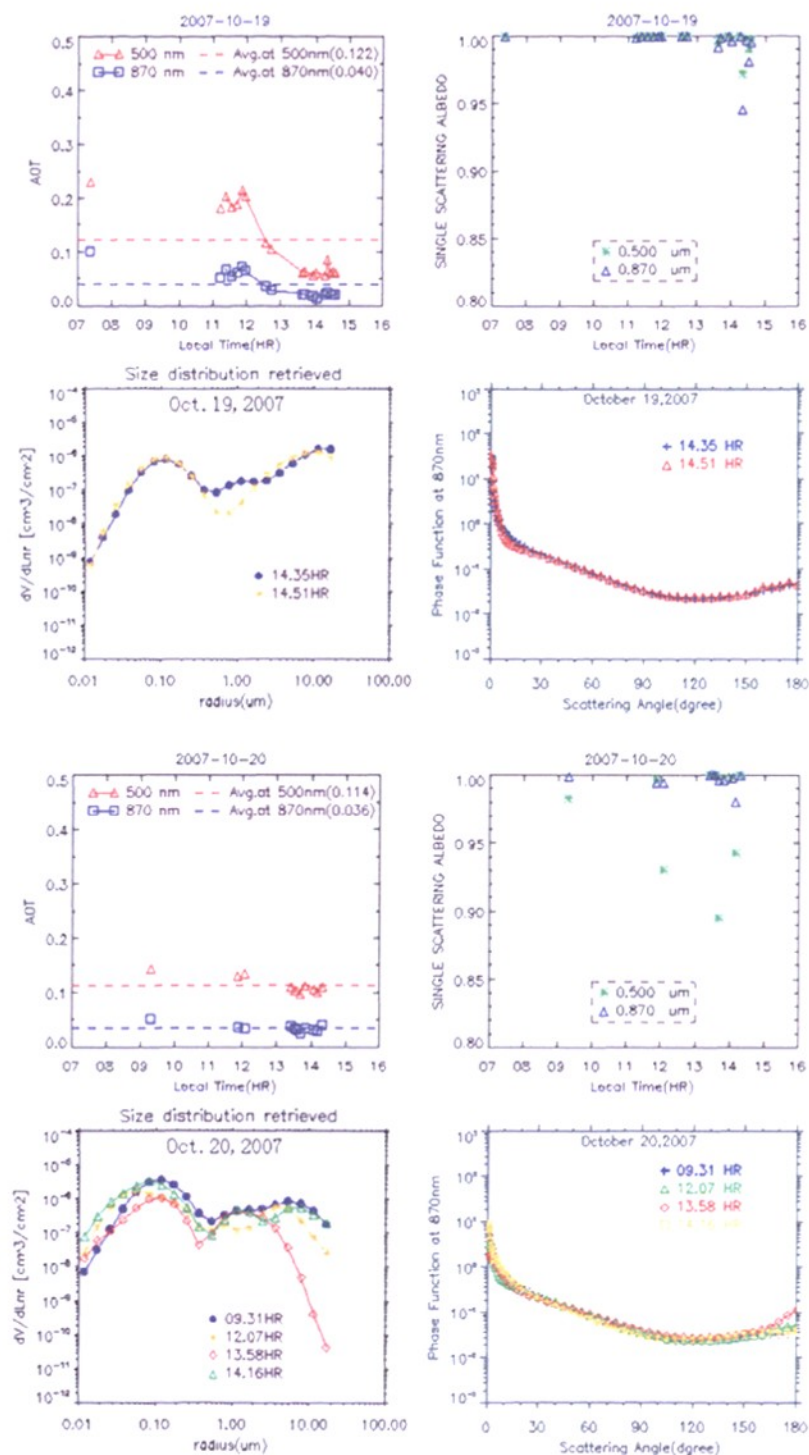
Table.5 每一观测日 500nm 和 870nm 两个波段的气溶胶光学厚度的统计分析

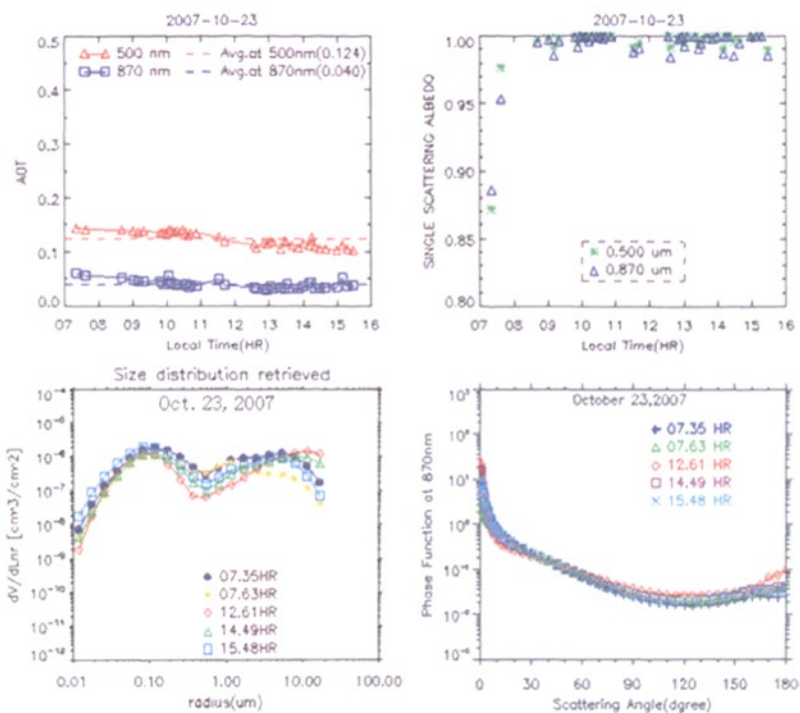
从 Table.4 和 Table.5 可以看出，在整个航次的观测过程中，气溶胶光学厚

度的最小值出现在 10 月 19 日, 500nm 和 850nm 的 AOT 分别为 0.057 和 0.015, 对应于该航次最清洁、晴朗的天气, 可以认为是秋季北黄海的背景气溶胶, 10 月 15 日、20 日和 23 日也可归于此类; 气溶胶光学厚度的最大值出现在 10 月 22 日, 500nm 和 870nm 的 AOT 分别为 2.003 和 0.850, 对应于有阴霾的天气。10 月 14 日、16 日和 17 日对应于一般海上的晴天天气; 10 月 21 日和 24 日对应于有轻雾或薄云的天气。

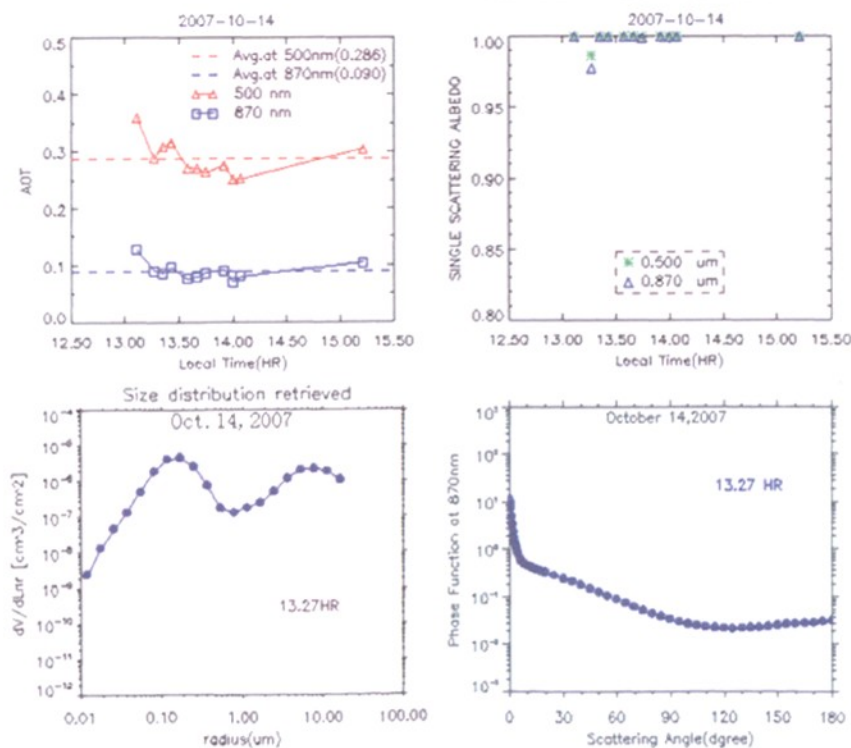
根据 Table.4 中气溶胶光学厚度的变化, 我们将分四种典型的情况进行分析, 分别是背景天气 (15、19、20、23 日)、晴天 (14、16、17 日)、有轻雾或薄云 (21、24 日) 和阴霾 (22 日)。Fig.9 给出了与这四种典型天气对应的气溶胶光学厚度、单次散射反照率和粒径分布体积谱, 相函数的时间序列反演结果。

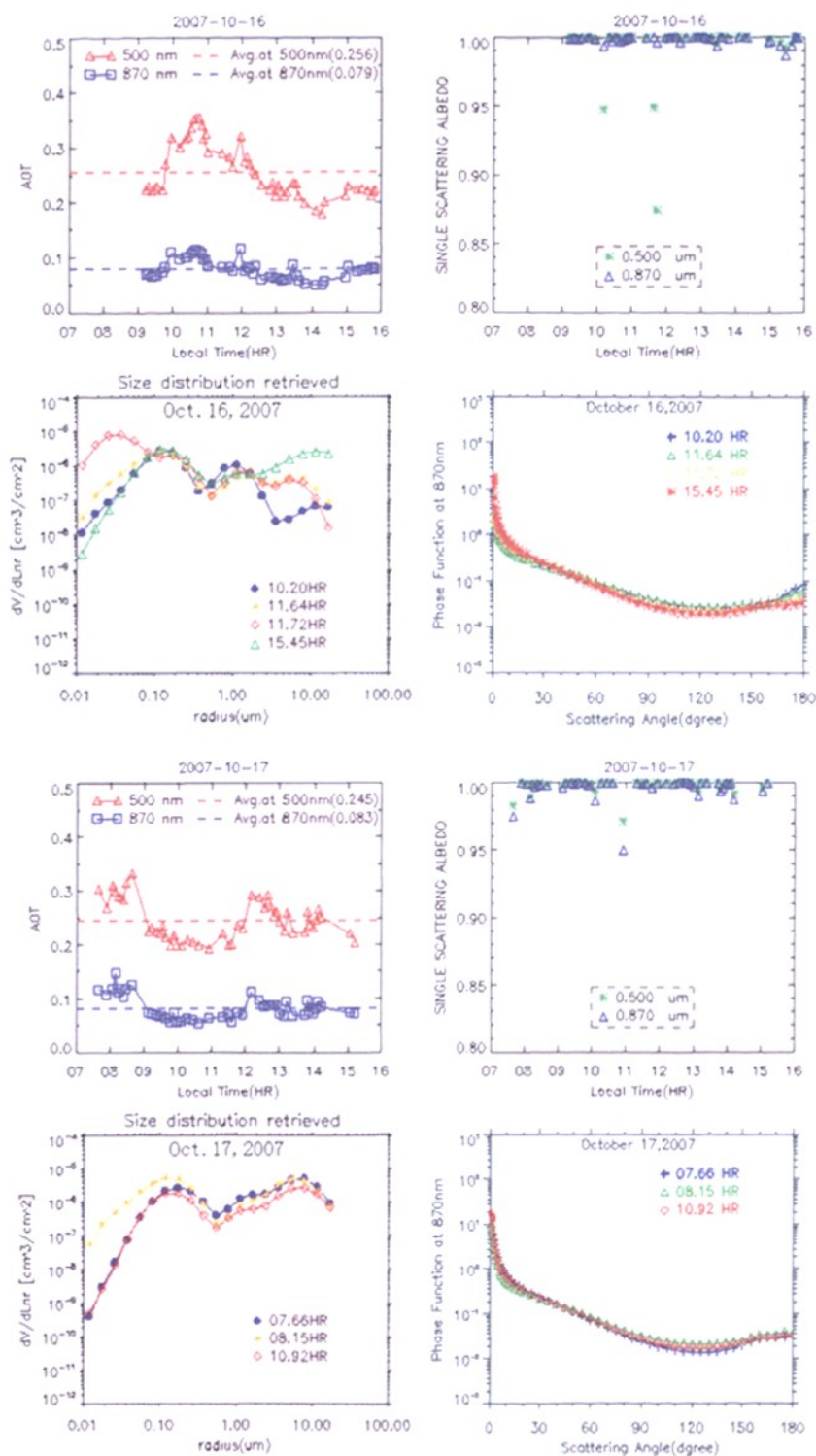




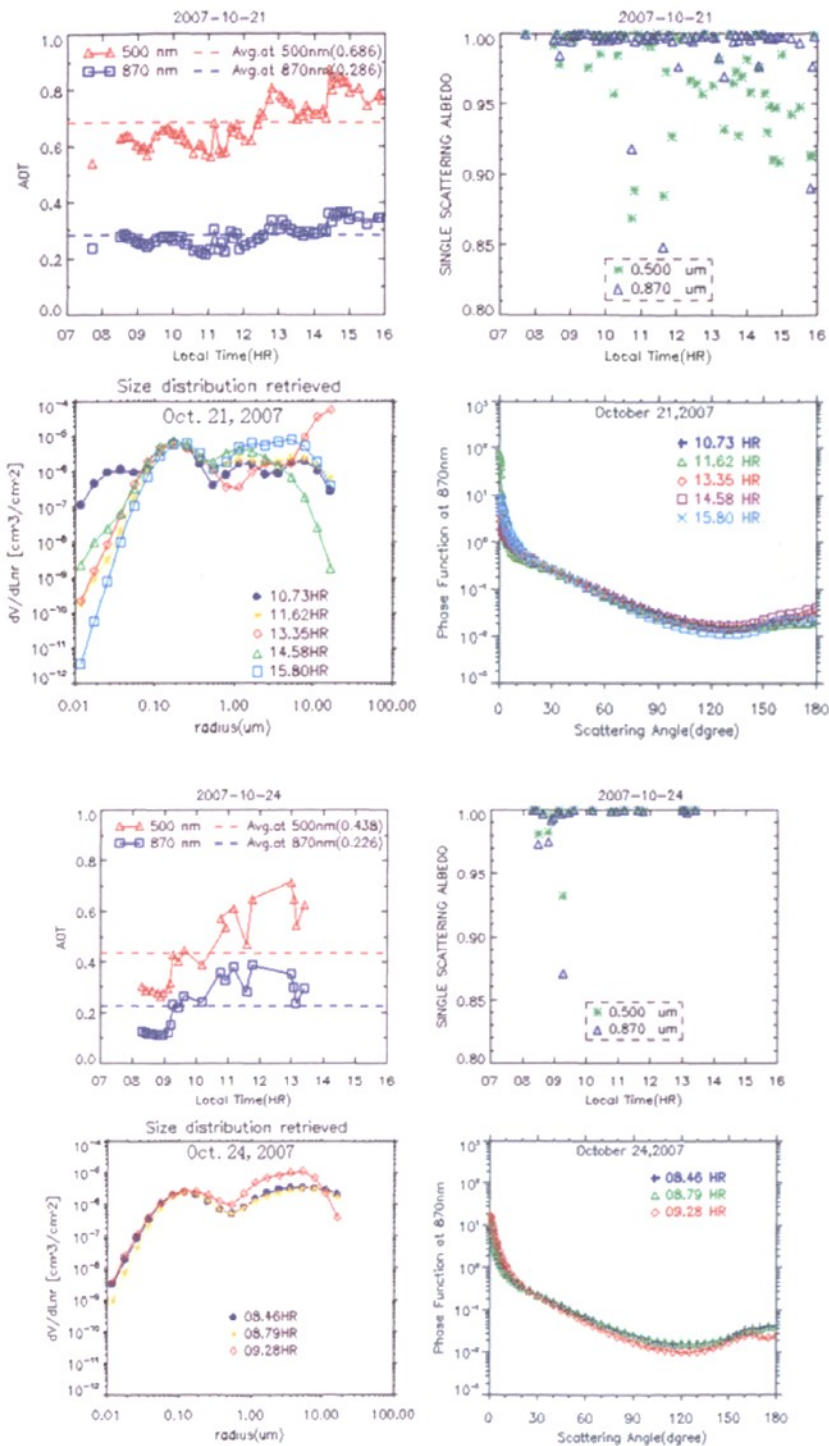


(a)海洋背景气溶胶

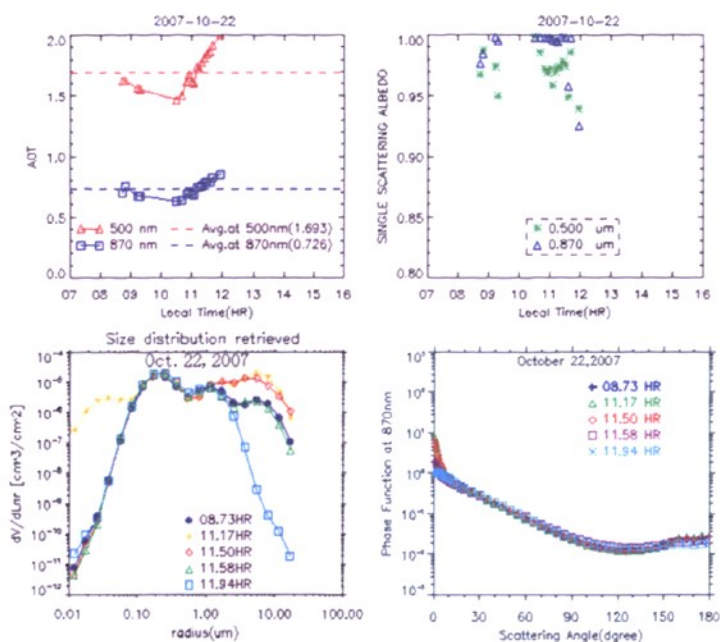




(b)晴天



(c)有轻雾或薄云



(d) 阴霾

Fig.9 四种典型天气下的气溶胶光学厚度、单次散射反照率、粒径体积谱分布和相函数的时间序列反演结果

(a) 海洋背景气溶胶 (b) 晴天 (c) 有云或雾 (d) 阴霾

4.3.1 气溶胶光学厚度

气溶胶光学厚度表征了大气对辐射的衰减程度, 大气越混浊, 其光学厚度越大; 单次散射反照率代表了气溶胶的散射和吸收特性, 单次散射反照率越小, 其吸收性越强; 而气溶胶粒径分布体积谱反映了气溶胶中大粒子和小粒子的相对含量。结合对应的气象记录, 可以看出, 由于海洋上空的天气情况变化频繁, 空气中除了主要的海盐气溶胶成分外, 可能有其它的成分如陆源大气污染物、沙尘等存在, 使得光学厚度的变化范围变大。

从 Fig.8 可以看出, 海洋上空的气溶胶光学厚度 (AOT) 变化非常快, 这是由于海洋上空的大气变化快所致。10月14、15、16、17、19、20、23日七天属于无云晴天, 也没有受到浮尘的影响, 所以这几天的气溶胶光学厚度都比较小(参阅表2), τ_{500} 的变化范围为 0.057 到 0.359, τ_{870} 的变化范围 0.015 到 0.148。其中 15、19、20、23日, τ_{500} 和 τ_{870} 处的均值接近, 且达到了最小均值, 所以

可以反映此次出海过程中北黄海海区上空大气气溶胶光学厚度的背景值；21, 22 日两天出现了雾或阴霾天气，特别是 22 日，阳光非常暗淡，所以这两天的光学厚度偏大，在 500nm 处， τ_{500} 的最小值为 0.540，其最大值达到了 2.003， τ_{870} 处的最小值为 0.216，最大值达到了 0.850；24 日属于多云天气，该天的 AOT 的值也比较大， τ_{500} 最小值为 0.265，最大值为 0.715， τ_{870} 最小值为 0.112，最大值为 0.389。这三天的光学厚度的变化足以反映了阴霾、浮云对太阳辐射有较强的衰减作用。18, 25 日是阴天，仪器无法工作。

综上所述，在晴天无云情况下，我国北黄海海区秋季的气溶胶光学厚度 (AOT) 在 500nm 处的典型值在 0.36 以下，870nm 处的值在 0.15 以下；多云情况下， τ_{500} 处的均值为 0.438， τ_{870} 的均值为 0.226；雾或阴霾的天气情况下，21 日，22 日 τ_{500} 处的均值分别为 0.686 和 1.693， τ_{870} 的均值为 0.286 和 0.726。在 500nm 和 870nm 处的气溶胶光学厚度变化的趋势基本一致。

4.3.2 气溶胶单次反照率

从单次散射反照率来看，在七天的无云晴天的 SSA，我们发现在该区域上空出现了不同程度的弱吸收情况，离岸较远的地方吸收弱一点，离岸近的地方吸收强一些。

14, 15 日两天的单次散射反照率绝大部分接近于 1，只有个别点处出现了弱的吸收，分析原因是由于这两天船的位置离陆地比较远，该区域大气受到陆地污染物的影响比较小，从整体上来说空气是比较干净的。16, 17, 19, 20, 23 日这 5 天中在 500nm 处 SSA 的最小值为 0.87 左右，出现在 23 日，870nm 处最小值为 0.89 左右，出现在 21 日，这几天离岸的距离比较近，可能受到了陆源污染物的影响。21, 22 日属于有雾或阴霾天气，在这两天中 500nm 处的 SSA 吸收比较强，最小值达到了 0.87 左右，870nm 处的 SSA 最小值达到了 0.85 左右，可见有雾或阴霾天气对 SSA 的影响很大。24 日属于多云天气，该天的 SSA 在 500nm 处的最小值达到了 0.93，870nm 处最小值达到了 0.87。

4.3.3 气溶胶粒径体积谱

在气溶胶粒度体积谱分布的反演中，首先要对半径参数的范围加以说明，根据 Kaufman et al.^[44] 建立的平均体积尺度谱的模型，他们将气溶胶尺度分为以下几种模式： $r < 0.3 \mu\text{m}$ 为聚类模式 (accumulation mode)； $0.3 < r < 0.8 \mu\text{m}$ 为同

温层气溶胶模式(stratospheric aerosol mode); $0.8 < r < 2.5 \mu\text{m}$ 为海盐粒子模式(maritime salt mode); $r > 2.5 \mu\text{m}$ 为粗粒子模式(coarse particles mode)。本文将采用这种粒子半径的划分模式,对单次散射反照率(SSA)出现弱吸收的位置的粒径体积谱进行分析。

14日,15日两天各有一次的弱吸收,从对应的粒径体积谱来看,聚类粒子,同温层的气溶胶粒子,海盐粒子的含量相近,趋势基本一致。而对于粗粒子,15日的含量比14日稍稍多一些;16日从弱吸收处的粒径体积分布看,各种粒子的含量明显比前两天要大,11.64H和11.72H处的粒径体积谱中,除了聚类粒子的含量有很大差异外,其它的部分趋势和含量相近,但是SSA处的吸收却出现很大差异。10.20H和11.64H相比粗粒子的含量有明显的不同,其它部分的含量相近,而SSA的值接近,所以我们有理由认为造成SSA弱吸收差异的原因与聚类粒子的含量多少有很大的关系。17日粒径体积谱显示,聚类粒子和粗粒子的含量较大,海盐粒子的浓度增加,曲线变化趋势一致;19日从弱吸收的粒径体积谱中可知,聚类粒子的含量和趋势是基本一致,粗粒子的含量稍稍不同,同温层的气溶胶和海盐粒子的含量有很大的差异,这可能是造成对应点SSA差异的主要原因;20日出现了4个弱吸收的过程,粗粒子在不同时刻都出现了含量下降的趋势,总体上讲聚类粒子的含量比较大;21,22日属于有雾或阴霾天气,这两天SSA弱吸收的点比较多,从各自的粒径体积谱来看,聚类粒子含量要多于其他的粒子,粗粒子的含量大多以减弱为主的趋势;23日从出现弱吸收的粒径体积谱来看,聚类粒子和同温层的气溶胶粒子,海盐粒子趋势一致,含量相近,粗粒子的含量有所不同;从24日的粒径体积谱图中可知,聚类粒子,同温层的气溶胶粒子含量和趋势相近,海盐粒子和粗粒子的浓度不同,这个不同导致了弱吸收处的SSA有很大差异。

4.3.4 气溶胶粒子相函数

相位函数用来描述行星大气中多次散射以及辐射传输的分析和应用的散射能的角度分布。从相函数来看,具有强吸收的地方,在散射角为 $150 \sim 180$ 度之间呈现水平状。各种类型的天气情况的相函数的前向散射要大于后向散射。没有吸收的站位在 $150 \sim 180$ 度之间有极大值和极小值。

4.3.5 小结

本节使用的船基资料是 2007 年 10 月 14—25 日秋季 908 航次的北黄海海域的调查实测数据,分析了 2007 年秋季我国北黄海海区大气气溶胶光学特性的特点,从中我们可以得到以下结论:

(a) 在无云晴天的情况下,我国北黄海海区的气溶胶光学厚度在 500nm 处的最小值为 0.057,最大值为 0.359,870nm 处的最小值是 0.015,最大值 0.148,可见,该海区的气溶胶光学厚度变化很快;多云情况下, τ_{500} 处的均值为 0.438, τ_{870} 的均值为 0.226;雾或阴霾的天气情况下,21 日,22 日的 τ_{500} 处的均值分别为 0.686 和 1.693, τ_{870} 的均值为 0.286 和 0.726。在 500nm 和 870nm 处的气溶胶光学厚度变化的趋势基本一致。

(b) 在秋季的北黄海海区的单次散射反照率 (SSA) 出现弱吸收的情况,无云晴天的情况下 500nm 处 SSA 的最小值为 0.87 左右,870nm 处最小值为 0.88 左右,总体是离岸远的地方弱吸收的值很小,离岸近的地方弱吸收的值要大些。有雾或阴霾的天气对 SSA 的影响也比较大。出现了同一位置不同波段的弱吸收不同的情况。

(c) 从出现弱吸收的点处的粒径体积谱来看,晴天无云情况下聚类粒子的含量要比其他粒子的含量要高些;同温层气溶胶粒子,海盐粒子,粗粒子的含量的多少对气溶胶的弱吸收也起着一定的作用。

(d) 相函数来看,前向散射 大于后向散射,有吸收的站位的相函数在 150~180 度的地方出现水平。没有吸收的站位在 150~180 度的地方有极小值和极大值。

4.4 典型站位的季节变化

在这些出海实测数据中,我们发现相同站位,不同季节的气溶胶光学特性数据,它们也可以反应该站点在不同的季节中的气溶胶光学特性的一些变化。Table.2 列出了这些站位的相关信息。其中颜色相同的记录为同一位置在不同季节里的相关信息。

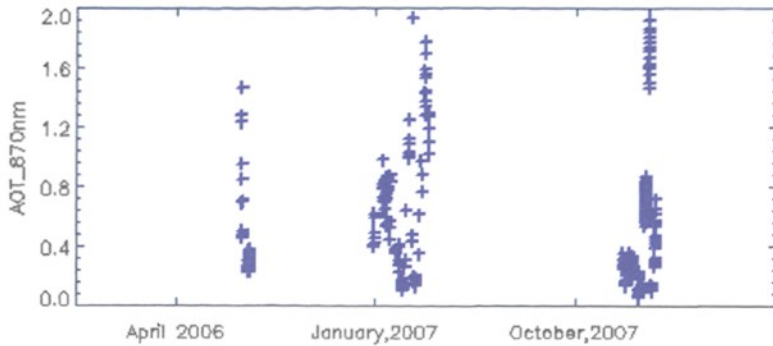


Fig.10 月变化气溶胶光学厚度

日期	站位	时间 (北京时)	经度	纬度	航次	天气情况
2006-4-19	A2	12.86	123.00	38.50	solas	晴, 浮尘
2007-01-04	A301	13.83	121.78	37.61	winter908	晴, 有云
2007-01-04	A302	14.08	121.76	37.75	winter908	晴, 薄云
2007-01-12	A506	08.50	123.00	38.50	winter908	晴, 无云
2007-01-08	C1001	09.44	124.00	39.65	winter908	晴, 无云
2007-01-08	A710	12.00	124.01	39.48	winter908	晴, 无云
2007-01-08	A709	13.52	124.00	39.25	winter908	晴, 无云
2007-01-09	A605	09.09	123.50	38.25	winter908	晴, 无云
2007-01-11	B203 (S0204)	11.62	123.00	37.45	winter908	云, 能见度低
2007-01-13	C507	38.12	122.21	38.12	winter908	晴, 少云
2007-01-14	A605	14.00	123.50	38.25	fall908	晴, 无云
2007-10-16	C1001	09.96	124.00	39.65	fall908	晴, 无云
2007-10-16	A710	13.45	124.00	39.48	fall908	晴, 无云
2007-10-16	A709	14.94	124.00	39.25	fall908	晴, 无云
2007-10-22	A302	08.73	121.76	37.75	fall908	晴, 有雾
2007-10-22	A301	10.50	121.75	37.61	fall908	晴, 有雾
2007-10-23	C507	38.12	122.21	38.12	fall908	晴, 无云
2007-10-24	B203 (S0204)	13.40	123.00	37.45	fall908	晴, 多云

Table.6 不同航次同一站位信息表

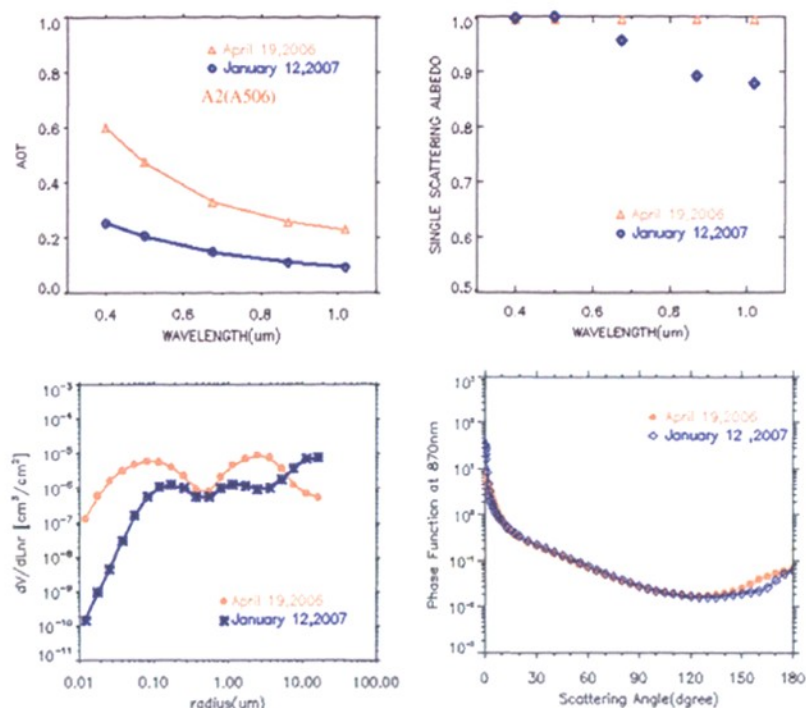


Fig.11 2006年4月19日和2007年1月12日在A2(A506)站位的观测结果

a) 气溶胶光学厚度 b) 单次散射反照率 c) 粒径体积谱 d) 相函数

由天气记录可知, 4月19日晴天有云, 1月12日是晴天无云。气溶胶光学厚度4月19日在500nm和870nm处的值分布为0.47和0.25左右; 1月12日500nm和870nm处的值为0.2和0.1左右。4月19日对应波长的气溶胶光学厚度比1月12日的大; 从单次散射反照率中可知, 该处在1月12日出现了弱的吸收过程, 说明在1月12日该上空有吸收性的气溶胶; 从粒径体积分布来看, 聚类粒子($r < 0.3 \mu\text{m}$)、同温层气溶胶($0.3 \mu\text{m} \sim 0.8 \mu\text{m}$)、海盐粒子($0.8 \mu\text{m} \sim 2.5 \mu\text{m}$)含量4月19日高于1月12日, 但是粗粒子($r > 2.5 \mu\text{m}$)4月19日有下降的趋势, 1月12日有上升的趋势。相函数告诉我们在150~180度之间4月19日后向散射的能量要大些。由此我们可以得出, 4月19日该地区上空有少量的浮云使得观测的气溶胶光学厚度增大, 但是气溶胶成分中不含有吸收性的物质, 垂直空气柱单位截面上的粒子体积相应也变大, 有薄云的影响, 使得4月19日的散射能量要大。再次说明 浮云对大气的能量散射的影响不可忽略。

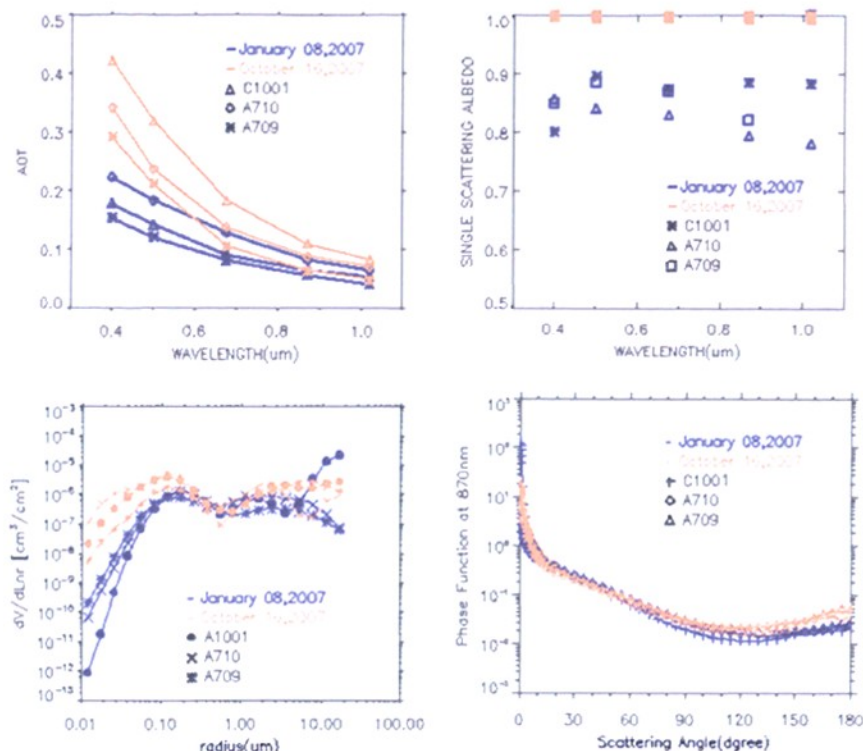


Fig.12 A1001,A710,A709 三个站在 winter908 和 fall908 处理结果
a)气溶胶光学厚度 b)单次散射反照率 c) 粒径体积谱 d) 相函数

这个站在 winter908 和 fall908 航次中,都属于无云晴天。上图中,相同颜色代表同一个航次中的站位,而不同的符号代表不同的站位。从 AOT 中可知 10 月 16 日的气溶胶光学厚度要大于 1 月 8 日的气溶胶光学厚度。同一航次不同站位的 AOT 趋势一致。SSA 显示在 1 月 8 日有明显的弱吸收的过程,而在 10 月 16 日却比较干净。粒子体积谱 1 月 8 日和 10 月 16 日在聚类粒子($r < 0.3 \mu\text{m}$)和粗粒子 ($r > 2.5 \mu\text{m}$)有很大的差别,单从各个航次来看趋势是一致的。相函数在同一航次中的趋势一致,在不同的航次中散射角 150~180 度间散射能量稍微有些差别。

我们可以得出,在无云情况下 10 月 16 日气溶胶光学厚度大,空气清洁,没有吸收物质,海盐粒子含量较高,粗粒子的变化没有使得气溶胶光学厚度增加。气溶胶光学厚度大,散射的能量也大。

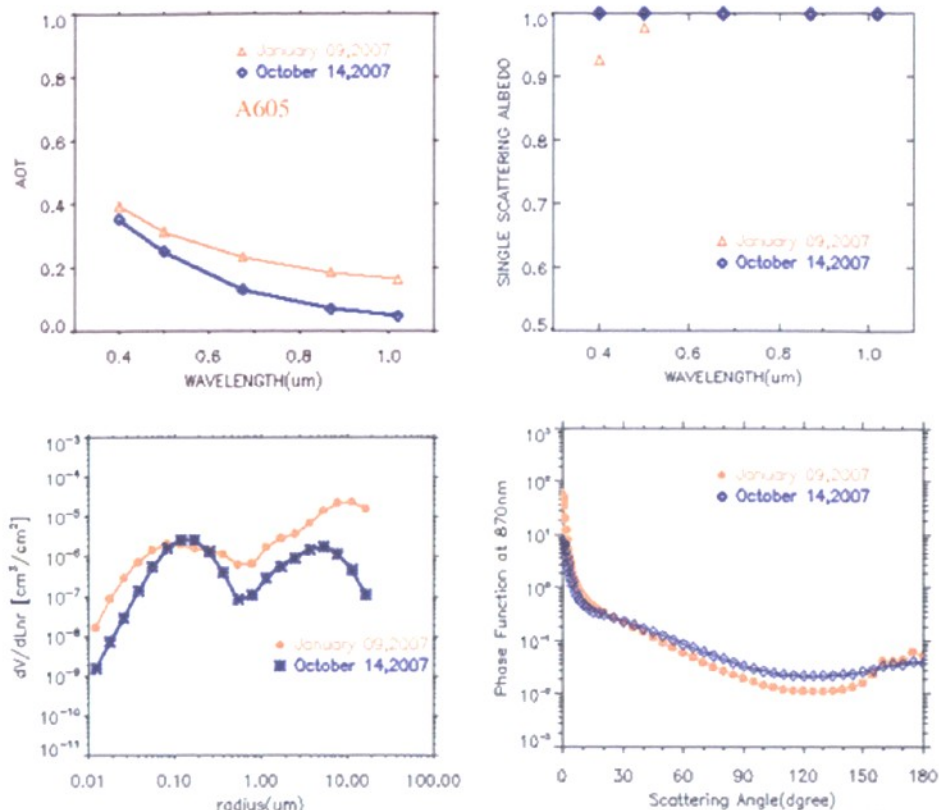


Fig.13 A605 站位在 winter908 和 fall908 航次结果

a) 气溶胶光学厚度 b) 单次散射反照率 c) 粒径体积谱 d) 相函数

气象记录显示都是无云晴天。由图 a) 可知, 1 月 9 日比 10 月 14 日的气溶胶光学厚度大。1 月 9 日, 在 500nm 和 870nm 处 AOT 分别是 0.3, 0.2 左右; 10 月 14 日 AOT 在 500nm 和 870nm 处分别为 0.23, 0.1。从 SSA 来看, 基本属于干洁的空气, 没有吸收性的物质。原因可能是, 离陆地远, 受到陆地源干扰小。气溶胶粒径体积谱来看, 1 月 9 日粗粒子的含量高, 而 10 月 14 日同温层气溶胶粒子含量高于海盐粒子和粗粒子的含量。相函数来看, 散射角在 90~180 度之间有差异, 总体上看, 后向散射 10 月 14 日比 1 月 9 日大。

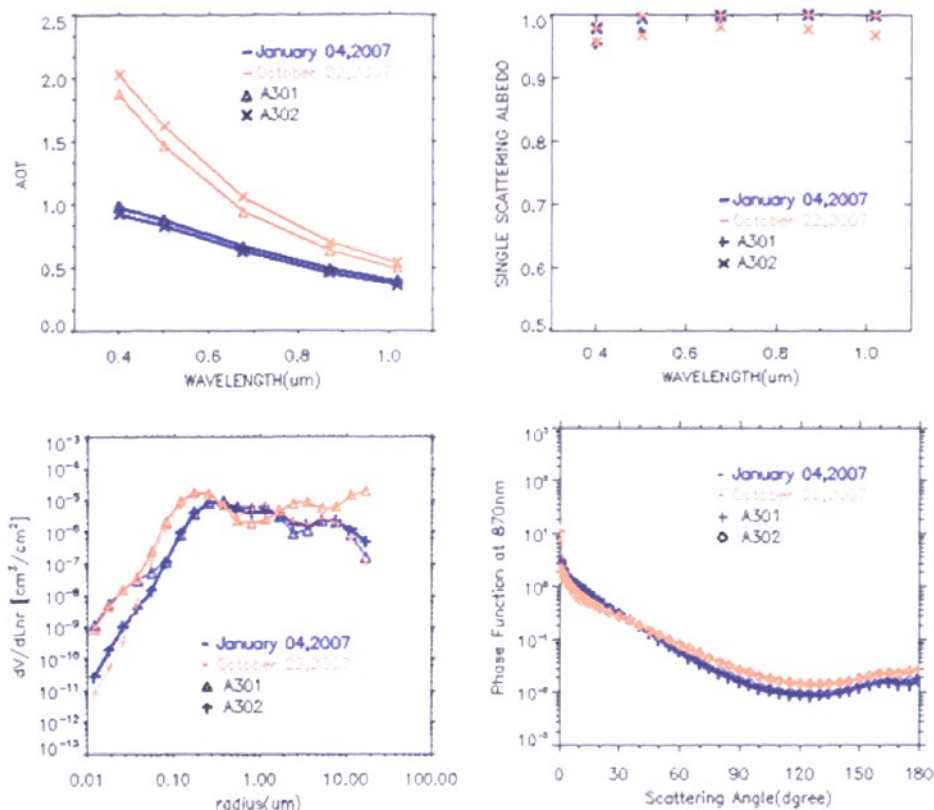


Fig.14 A301 和 A302 在 winter908 和 fall908 航次结果

a) 气溶胶光学厚度 b) 单次散射反照率 c) 粒径体积谱 d) 相函数

气象记录显示,在1月4日站位A301和A302初有薄云,在10月22日有雾。从气溶胶光学厚度的图来看,10月22日的要比1月4日大很多,同一航次的两个站位趋势一致,相差不大。A301和A302在1月4日500nm和870nm处的值分别是0.71, 0.71和0.52, 0.53。10月22日在500nm和870nm处的值是1.6, 1.4和0.82, 0.85左右。单次散射反照率来看该处的大气比较干净,上空大气未受到吸收性气溶胶干扰。从粒径体积谱来看,10月22日粗粒子含量比1月4日高。同一航次中,10月22日的A301粗粒子的含量比A302高。相函数来看同一航次的相函数基本一致;在10月22日后向散射大于1月4日的。究其原因就是雾天对气溶胶光学参数影响较大。

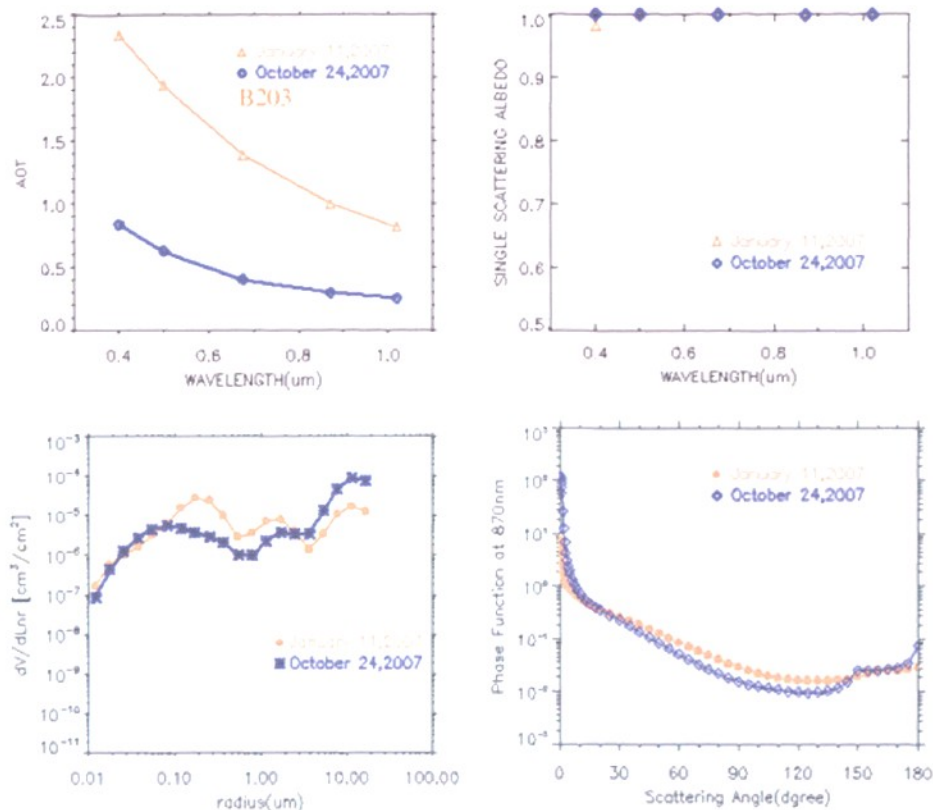


Fig.15 B203 站位在 1 月 11 日和 10 月 24 日的数据处理结果

a)气溶胶光学厚度 b)单次散射反照率 c) 粒径体积谱 d) 相函数

由气象记录可知 1 月 11 日 是云雾天气能见度低, 10 月 24 日属多云天气。从气溶胶光学厚度来看, 1 月 11 日在各个波段的 AOT 的值普遍大于 10 月 24 日。1 月 11 日在 500nm 和 870nm 处的值为 1.87, 1.2 左右, 10 月 24 日在 500nm 和 870nm 处的值为 0.7, 0.3 左右。从单次反照率来看, 该站位上空的大气比较清洁, 未受到吸收性气溶胶的影响。从粒径体积谱来看, 1 月 11 日的同温层气溶胶粒子, 海盐粒子含量较高, 10 月 24 日粗粒子含量较大。从相函数来看, 在散射角 30~150 度之间, 相位有些不同。

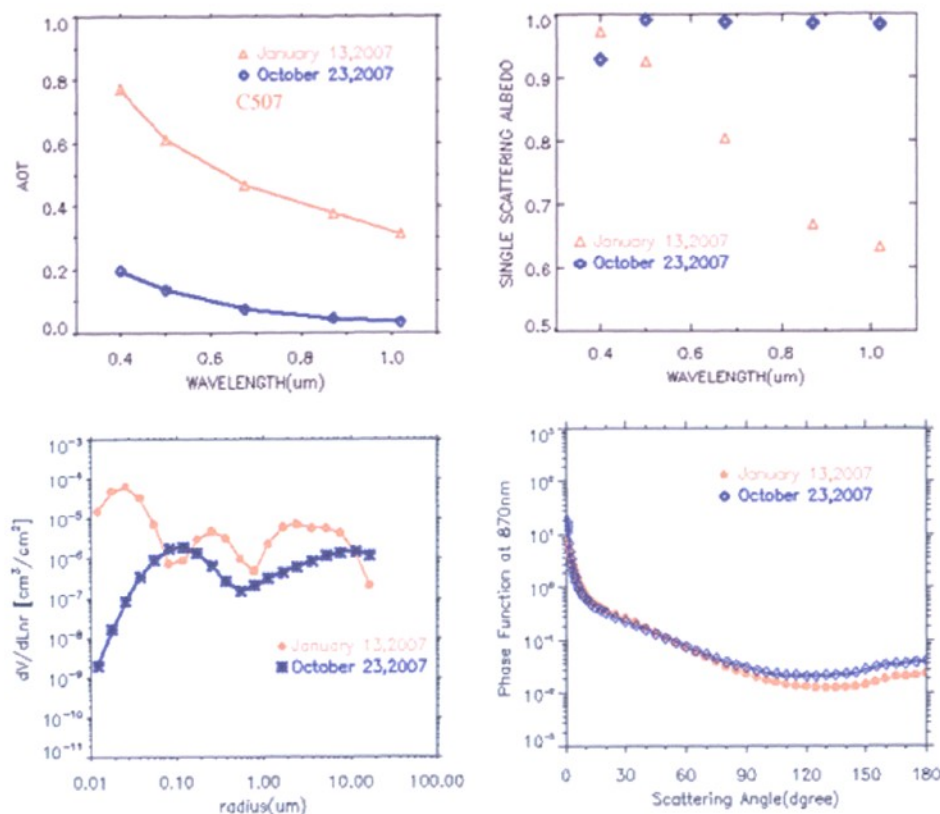


Fig.16 C507 站位在 1 月 11 日和 10 月 24 日的数据处理结果

a)气溶胶光学厚度 b)单次散射反照率 c) 粒径体积谱 d) 相函数

由气象记录可知 在 1 月 13 日是有云晴天。10 月 23 日是无云晴天。从气溶胶光学厚度来看, c507 在 1 月 13 日的 500nm 和 870nm 处的气溶胶光学厚度分别为 0.6, 0.3。10 月 23 日的 500nm 和 870nm 处的气溶胶光学厚度分别为 0.13 和 0.04。AOT 值有云的情况 比无云的情况大。从单次散射反照率来看, 在 1 月 13 日有个弱吸收的过程, 又由该站点的地理位置来看, 离陆地近, 该处受到了陆地源的影响。从粒径体积谱来看, 1 月 13 日, 聚类粒子, 同温层气溶胶粒子, 海盐粒子含量都比较高, 但粗粒子的含量在该日却有下降的趋势。10 月 23 日同温层气溶胶粒子比海盐粒子含量稍高, 粗粒子含量有下降的趋势。从相函数来看, 10 月 23 日比 1 月 13 日在 120~180 度的地方后向散射大。

第五章 结束语

5.1 本文小结

本文使用了春季 solas (2006.4), 冬季 908 航次 (2007.1), 秋季 908 航次 (2007.10) 三个航次的实测船基数据分析了我国北黄海区 (121.00E—124.00E, 37.00N—39.75N) 大气气溶胶在春, 秋, 冬三个季节的光学特性。这些光学特性包括气溶胶光学厚度, 单次散射反照率, 气溶胶粒径体积谱分布, 相位函数。

根据气象记录把各个航次的数据分为晴天无云 (背景气溶胶), 晴天有雾, 薄云, 阴天有雾, 阴霾等情况进行研究, 研究表明:

	500nm		870nm	
	min	max	min	max
Spring	0.240	0.290	0.100	0.130
Fall	0.057	0.233	0.015	0.101
Winter	0.100	0.300	0.040	0.200

Table. 7 无云晴天 (海洋背景气溶胶) AOT

1. 春季大气气溶胶光学厚度无云晴天时大于冬季和秋季的 AOT。呈现离岸近, 光学厚度相对较大, 离岸远 AOT 相对较小的态势。根据有关观测结果^[45], 我国北方发生沙尘暴时, 在 550nm 的 AOT 的值可以达到 1.0 以上, 而出现少量沙尘的站位 τ_{500} 值 0.46 远远低于我国北方地区发生沙尘暴时的值, 这也说明沙尘从源区经过远距离的输送和沉降到达海洋上空后它的浓度变得很低, 因而对太阳辐射的削弱作用也变小了, 这与已知的研究结果^[46]和人们的普遍认识是相当一致的。单次散射反照率分析, 春季北黄海上空的大气存在较强的吸收, 究其原因是大气中含有陆地污染源的气溶胶粒子, 相对而言存在吸收的站位粗粒子, 同温层粒子, 海盐粒子的含量都比较高。
2. 在冬季我国北黄海区 多以有雾天气居多, 这个航次中以一些典型站位为观测点分析了每个站位的气溶胶光学厚度, 单次散射反照率, 粒径体积谱, 相位函数的特点。研究表明: 在无云情况下的背景气溶胶光学厚度 500nm 处值在 0.2~0.3 之间, 870nm 处在 0.28~0.5 之间。阴天有雾和阴霾天气的气溶胶光学厚度较大。单次散射反照率随波长的变换来看, 从冬季北黄海区有些离岸较近的站位的观测结果来看, SSA 随波长的增加有减小的趋势, 结合 AOT 分析可以确认这种现象是由于北方冬季燃煤取暖使得空气中气溶胶

吸收性增强。这种吸收性也体现了离岸近吸收性较强, 离岸远吸收较弱的情况。从粒径体积谱来看, 半径 $1\mu\text{m}$ 处的气溶胶粒子的体积在无云晴天时含量要小于有雾晴天, 有雾阴天, 阴霾情况下一个数量级。相函数在无云晴天情况下出现较强的后向散射, 其它情况下在散射角为 $150^\circ \sim 180^\circ$ 时相函数呈现水平状。

3. 秋季航次数据众多, 将这个航次的数据以天为单位进行了分析, 分析结果表明: 秋季我国北黄海海区气溶胶光学厚度无云情况下 τ_{500} 在 $0.06 \sim 0.36$, τ_{870} 在 $0.02 \sim 0.15$ 。有雾和阴霾天气下 τ_{500} 分别达到了 0.68 和 1.67 , τ_{870} 分别在 0.286 和 0.726 。从单次反照率来看, 该海区在秋季存在着较强的吸收, 呈现规律是离岸近吸收强 离岸远吸收弱。分析起原因是由于空气中混入了来自大陆矿物质气溶胶或者人类活动产生的气溶胶所致。气溶胶粒径体积谱, 晴天情况下 $1\mu\text{m}$ 处的值靠近 $10^{-7} \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 轻雾或薄云情况下靠近 $10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}^2$, 阴霾情况下大于 $10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}^2$, 但粗粒子的含量减少, 原因是湿度大的水汽将空气中的小粒子结合成大粒子, 然后由于沉降作用使得大粒子减少了。相位函数体现了极强的前向散射, 在晴天无云情况下后向散射较强, 在 $150^\circ \sim 180^\circ$ 见出现极小和极大值。

5.2 展 望

本文使用了三个航次的船基实测数据对北黄海海区气溶胶光学厚度, 单次散射反照率, 粒径体积谱分布, 散射函数进行了分析。下一步的工作是利用这些实测资料来验证卫星数据的准确度, 从而提出改进型的算法, 为提高我国的海色遥感数据产品的精度提供参考。

参考文献

- [1] 章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程. 北京: 气象出版社, 1995.
- [2] Merrill, J.T., M. Uematsu, and R. Bleck, Meteorological analysis of long range transport of mineral aerosols over the North Pacific, *J. Geophys. Res.*, 94, 8584-8598, 1989.
- [3] Shaw, G.E., Transport of Asian desert aerosol to the Hawaiian Islands, *J. Appl. Meteorol.*, 19, 1254-1259, 1980
- [4] Merrill, J.T., M. Uematsu, and R. Bleck, Meteorological analysis of long range Transport of mineral aerosols over the North Pacific, *J. Geophys. Res.*, 94, 8584-8598, 1989
- [5] Husar, R.B., J.M. Prospero, and L. L. Stowe, Characterization of tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA advanced very high resolution radiometer optical thickness operational product, *J. Geophys. Res.*, 102, 16,889-16,909, 1997
- [6] Menon, S., J. Hansen, L. Nazarenko, and Y. Luo, Climate Effects of Black Carbon Aerosols In China and India, *Science*, 297, 2250-2253, 2002
- [7] He, M.X., Z.S. Liu, K.P. Du, L.P. Li, R. Chen, K. Carder, and Z.P. Lee, Retrieval of chlorophyll from remote sensing reflectance in the China Seas, *Appl. Opt.* 39, 2467-2474, 2000.
- [8] Ramaswamy, V., O. Boucher, J. Haigh, D. Hauglustaine, J. Haywood, G. Myhre, T. Nakajima, G.Y. Shi, and S. Solomon. Radiative forcing of climate change, In *IPCC 2001: Climate Change, The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report Of The Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., et al. (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001: 881 PP
- [9] 丘明艳, 青岛地区气溶胶特性的初步研究, 中国海洋大学, 2004
- [10] Bates, T.S., Huebert, B.J. et al., International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Project's first Aerosol Characterization Experiment (ACE-1): Overview. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(D13), 16,297-16,318
- [11] Quinn, P.K., Coffman, D.J. et al., Aerosol Optical Properties in the marine Boundary layer During the First Aerosol Characterization Experiment (ACE-1) and the underlying chemical and physical aerosol properties. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(D13), 16547-16563
- [12] Carrico, C.M. and Rood, M.J., Aerosol light scattering properties at Cape Grim, Tasmania,

- p>
during the First Aerosol Characterization Experiment (ACE-1).J.Geophys Res.1980,103 (D13),16,565-16,574
- [13] Verve,G.Raes,F.et al., The Second Aerosol Characterizen Experiment(ACE-2) :Meteorological and chemical context.Tellus,2000,520B,126-140
- [14] Quinn,P.K.and Bates,T.,Comparison of regional aerosol chemical and optical properties from the European,Asian and The North American plumes.IGAC tivities Newsletter, 2003,28,24-30
- [15] Quinn,P.K.,Coffman,D.J.et al.,Aerosol optical properties during INDOEX 1999:Mean ,variabilities, and controlling factors.J.GEOphys.Res.,2002,107(D19),INX3,19-1~19-25
- [16] Satheesh.S.K.and Ramanathan,V.,Large Differences in the tropical aerosol forcing at the top of atmosphere and Earth's surface.Nature,2000,405,60-63
- [17] Ackerman,A.S.,Toon,O.B.et al., Reduction of tropical cloudiness by soot.Science,2000,288, 1042-1047
- [18] Hbert,B.J.,Bates,T.,et al., An overview of ACE-ASIA:Strateies for quantifying The relationships between Asian aerosols and their climatic impact.J.Geophys.Res.,2003, 108(D23),ACE-1~1-20
- [19] Anderson,T.L.,Masonis,D.S. et al.,Variability of aerosol optical properties derived from in situ aircraft measuments during ACE-Asia.J.Geophys.Res.,2003,108(D23),ACE15-1~ 15-19.
- [20] Quinn,P.K. and Bates,T.S.,North American,Asian and Indian haze:Simlar regional impacets on climate?Geophys.Ges.lett.,2003,in press.
- [21] Holben,b.,kaufman,Y.,Eck,T. 等 .AERONET-A federated instrurment network and data archive for aerosol characterization[J].Remote sensing of Environment,1998,66(1):1-16.
- [22] Smirnov,A.,Holben,B.,kaufman,Y.etc.optical properties of atmosphere aerosol in maritime environments[J].Journal of the atmospheric sciences,2002,59(3):501-523
- [23] Vinoy,v.,satheesh,s.measurements of aerosol optical depth over Arabian sea during summer monsoon season[J].geophys.RES.let,2003,30(5):1263.
- [24] Smornov,A.,Holben,B.N.,sakerin,S.M etc.ship-based aerosol optical depth measurements in the Atlantic ocean:comparison with satellite retrievals and GOCARTmodel[J] .Geophys Res.lett.,2006,33(14):1-4

- [25] 赵柏林, 俞小鼎.海上大气气溶胶的卫星遥感研究.科学通报,1986,31:1645-1649
- [26] 张军华, 斯召俊, 毛节泰, 王美华.GMS 卫星遥感中国地区气溶胶光学厚度.大气科学, 2003, 27(1):23-35
- [27] 李正强等, 黄海海域气溶胶光学厚度测量研究, 量子电子学报, 20 卷第五期
- [28] 赵威, 唐军武, 高飞, 林明森 ,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
- [29] 周良明, 郭佩芳, 刘玉光.渤海上空大气衰减光学厚度的研究[J], 高技术通讯, 2005.15 (6): 102-105.
- [30] 沈彦波, 王标等, 2006 春我国东部海域气溶胶光学厚度与沙尘天气, 地球科学进展, 2008, 3
- [31] 刘大召, 田礼乔, 杨锦坤等.南海北部海域气溶胶光学厚度研究[J]. 热带气象学报, 2008.24(2):205-208
- [32] K.N.LIOU.大气辐射导论(第二版)(M), 北京:气象出版社.2004.78-94.
- [33] 邱明燕.青岛地区气溶胶特性的初步研究.硕士论文.青岛:中国海洋大学.2004.
- [34] 王耀庭,王桥,王艳姣等.大气气溶胶性质及其卫星遥感反演.2005,18(6):27-33.
- [35] Vermote E,Tame D,Derz J.L.,et al.6S User Guide Version 2.France:Laboratoire d'Optique Atmospherie,1997,110-160.
- [36] 刘长盛, 刘文保, 大气辐射导论, 南京大学出版社, 1990
- [37] Sky Radiometer POM-01MK02 仪器使用说明书, 2006,第 2 页.
- [38] K.N.LIOU.大气辐射导论(第二版)(M), 北京:气象出版社.2004.26-30
- [39] Gordon H R. Remote sensing of ocean color: a methodology for dealing with broad spectral bands and significant out-of-band response[J].Applied Optics, 1995. 34(36) :8363
- [40] Stewart R.H .Methods of Satellite Oceanography.University of California Press.1985. 360pp.
- [41] Teruyuki Nakajima,Glauco Yonna,Ruizhong Rao,Paolo Boi,Yoram Kaufman,and Brent Holben. Use of brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions[J] .Optical Society of America,1996.35(15):2672-2686
- [42] T.nakajima,M.tanaka,and T.Yamauchi,"Retrieval of the optical properties of aerosols from aureole and extinction data",Appl.Opt.22,2951-2959(1983)
- [43] Pietras,C., Frouin,R., Nakajima, T.et al.. Fall Meeting Aerosol Properties derived from the PREDE

POM-01 Mark II Sun Photometer[C]. American Geophysical Union, 2001.52-76

- [44] Y.jKaufman, B. N. Holben, L .Rember,A.Gitelson,A. Karnieli,and T. Nakajima,
“Measurement of the ambient aerosolbackscattering fraction,”in Abstracts of the Fourth
International Aerosol Conference[C] ,UCLA (University of California, LosAngeles, Calif.),
1994 :43-47.
- [45] 申彦波, 沈志宝等. 2001 年春季中国北方大气气溶胶光学厚度与沙尘天气[J],高原气象,
2003, 22 (2) : 185—190
- [46] 申彦波, 石广玉, 亚洲内陆沙尘入海通量的数值模拟研究[C]//冯士祚, 石广玉, 高会
汪等编著. 上层海洋与低层大气研究的前沿科学问题. 北京: 气象出版社, 2006: 93
—99

致 谢

首先我要感谢导师陈文忠副教授三年来对我的关怀和培养,不管是在学业上还是在生活上,他都给了我非常多的启发、鼓励和帮助。这篇论文能得以最终完成,也是和老师的谆谆教诲、悉心指导和极大关心分不开的。他治学、为人的态度都深深的感染了我,使我终生受益。

感谢贺明霞教授、刘智深教授、赵朝方教授在学习上对我们的指点和帮助,也感谢他们为我们提供了学习条件和良好的学术氛围;同时他们忘我的工作精神和一丝不苟的严谨作风,也使我受益非浅。

感谢遥感所所有的老师在学习和生活上对我的帮助。

感谢来自国家海洋信息中心的李尉尉小姐,您的热心帮助使我的论文得以完成。

感谢杜祥之、郑凯、闫传忠、刘斌、纪萍、刘雁、刘小燕、李丹、赵丽静、等同学在学习和生活上的无私帮助和关心,因为你们,我三年的研究生生活才变得丰富多彩,充满快乐。还要感谢贺双颜博士、王勃博士在学习上的指导和帮助。

感谢我的家人,没有他们的支持、鼓励和关怀,我是不可能走到今天的。最后,我要再一次感谢每一个帮助过我关心过我的人。

个人简介

董文，男，山西省人

1999～2003，中国地质大学（武汉）主修地图学与地理信息系统

2006～2009，中国海洋大学（青岛）主修物理海洋学（海洋技术）

发表论文情况

董文.2007 年秋季北黄海水区大气气溶胶光学特性观测研究（已被大气环境与科学学报期刊录用）