

中国海洋大学

硕士学位论文

卫星遥感资料在研究中国海气溶胶时空分布中的应用

姓名：邵长江

申请学位级别：硕士

专业：地图学与地理信息系统

指导教师：陈文忠

20070601

卫星遥感资料在研究中国海气溶胶时空分布中的应用

摘 要

本论文首先利用海上现场实测资料与卫星资料进行对比分析,在此基础上,利用2000年至2006年长时间序列的SeaWiFS卫星遥感资料(结合Aqua/MODIS),研究了我国海区(主要是黄海)气溶胶的时空分布特性及变化规律,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。

主要包括以下几方面的内容:

- 1、利用现场观测资料对卫星反演资料进行印证;
- 2、利用长时间序列的卫星遥感资料研究我国典型海区(黄海、东海等)气溶胶的月、季分布特性及变化规律;
- 3、分析我国沙尘暴、煤烟等大气污染过程对气溶胶分布的影响。

本论文采用的现场观测资料主要包括中国SOLAS 2006春季黄海航次出海实验、2006冬季908北黄海航次、2006年冬季973东海航次获得的资料以及与国内外合作单位之间交流、共享的资料。卫星遥感资料以2000-2006年7年尺度的SeaWiFS资料为主,采用NASA推荐的SeaWiFS数据处理软件SeaDAS进行处理。其它卫星传感器,如Aqua/MODIS作为辅助,研究了我国海区气溶胶的时空分布特性及变化规律及其与我国典型沙尘暴、煤烟等大气污染过程的关系。初步的研究结果表明:春季我国海域的气溶胶光学厚度较其它月份要高一些,这主要是受每年春季爆发的沙尘暴的影响;渤海海域气溶胶光学厚度值1月份最低,4月份最高,7月份、10月份依次减小;黄海、东海海域的气溶胶光学性质比较接近,呈季节分布,春、夏季气溶胶光学厚度值较高,秋、冬季较低,且受陆源气溶胶的影响较大,由近岸到大洋,气溶胶光学厚度值呈逐渐减小的趋势。

关键词: 气溶胶; 卫星遥感资料; 现场观测; 沙尘暴

The application of satellite remote sensing data in the study on the spatial-temporal distribution of aerosol in Chinese sea

Abstract

This paper compares and analyses the sea measurement data and satellite information. On this basis, using the long sequence of SeaWiFS satellite remote sensing data (Combining Aqua/MODIS) between the 2000-2006 year. It studies the properties and changing law of spatial-temporal distribution of aerosol. And it simply analyses the air pollution's effect on the distribution of aerosols in Chinese sea areas (mainly the Yellow Sea), such as the dust storms, soot and other aero-pollution.

Firstly, this paper confirms the satellite data using of the spot observations data; Secondly, using long sequences of satellite remote sensing data in Chinese typical area (the Yellow Sea, East China Sea, etc.), it studies the law of the aerosol's quarter distribution and variation; Thirdly, it analyses of the sandstorm, soot and other air pollution in the process of distribution of aerosols.

This paper adopts the scene observational data, mainly including the experiments of the China SOLAS Yellow Sea voyage in 2006 spring, the sea voyages 908 of the North Yellow Sea in Winter 2006, the sea voyages 973 of the East China Sea in winter 2006 and the information obtained through the co-operation between domestic and foreign exchanges. This paper mainly uses the scale of the SeaWiFS data in the period of the year 2000-2006 as the satellite remote sensing data, and adopted the SeaWiFS data-processing software SeaDAS recommended by NASA of processed. It researches the area of the spatial-temporal distribution of aerosol properties and changes in the law and the relationship with our typical sandstorms, soot and other air pollution process in China, through the other satellite sensors such as Aqua/MODIS which is the assistant supplement. The preliminary results of the study shows that waters of the aerosol optical of Spring is thicker than other months', which subjects to the annual dust storms in Spring. Bohai Sea's aerosol optical is thicker than the lowest value in January, most in April maximum, decreases in turn July and October. the aerosol optical properties of Yellow Sea is similar with East China Sea's, and aerosol optical thickness values is higher in the spring and summer, autumn and winter are low and land-based sources of aerosols by a relatively big impact from the shore into the ocean, aerosol optical thickness values are gradually decreasing trend.

Keywords: aerosols; satellite remote sensing data; spot observation; sandstorm

1 前言

1.1 研究背景及国内外研究现状

大气气溶胶是悬浮在大气中的各种固态和液态的粒子,其半径大约为 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ 。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^{[1][2][3]}。Menon等^[4]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。

此外,大气气溶胶还是环境研究、大气订正中的重要因子之一。气溶胶光学厚度作为气溶胶最基本的光学特性,是研究气溶胶作用的基础。长时期、大范围气溶胶光学厚度资料的缺乏是目前的主要问题。解决这一问题的比较可行的途径是卫星遥感方法,国外有很多研究成果,国内也做了大量的研究工作,如毛节泰等^[5]、张军华等^[6]、李成才等^[7]都对如何从卫星资料反演气溶胶光学厚度进行过深入的研究。

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^[8]。我国海区气溶胶时空分布特性的研究将为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。

长时期、大范围气溶胶观测资料是研究我国海区气溶胶时空分布特性的前提。现场实测气溶胶数据主要通过船舶、海上浮标及沿岸站等常规观测系统获得,国际上主要有 AERONET、SKYNET等。我国国家气象局、中国科学院大气物理研究所等,也都积累了长期的观测资料。这些观测大部分都是在陆地上进行的,也是影响海洋上空的气溶胶的主要因素。对于卫星遥感气溶胶资料的印证,海洋上空的气溶胶现场观测资料是必不可少的。本论文采用的海上观测资料将包括ACE-Asia 2001大型现场调查实验资料、中国SOLAS 2006春季黄海航次、我校908及973多个航次出海实验获得的资料、以及与国内外合作单位之间交流、共享的资料。总之,我国海域海洋上空的气溶胶观测资料还比较少,无论从时间上的同步性还是空间分布的连续性都尚不能满足要求。

长时期、大范围气溶胶光学厚度资料的缺乏是目前的主要问题。解决这一问题主要有现场实测方法和卫星遥感技术。现场实测数据主要通过船舶、海上浮标及沿岸站等常规观测系统,无论从时间上的同步性,还是空间分布的连续性都不能令人满意,而卫星遥感资料是解决这一问题的根本途径。自从气象卫星问世后,人们开始研究利用气象卫星资料反演气溶胶光学厚度。到目前为止,卫星遥感大气气溶胶资料已经有相当长时间的积累,其中代表性包括:最早的 CZCS (1979-1986年)、美国大气海洋局(NOAA)系列卫星 AVHRR 传感器(1978年至今)及美国 SeaWiFS 传感器(1997年至今)。除此之外,还有美国宇航局(NASA)的 MODIS (2002年至今)、欧洲空间局(ESA)的 MERIS (2003年至今)等新一代传感器。这些传感器积累的长时间序列、全球覆盖的气溶胶观测资料为我们研究我国海区气溶胶时空分布规律及相关应用研究奠定了基础。

卫星对地监测中不可避免地受到大气气溶胶的影响,给准确获得地表信息带来一定的困难,但卫星资料却包含了几乎全球范围内丰富的气溶胶信息,其中利用卫星遥感大气气溶胶光学厚度具有重要的意义。它是常规资料比较缺乏地区气溶胶光学厚度信息的重要来源,也是卫星监测资料的一部分,特别是可见光和近红外通道是进行气溶胶实时修正的主要信息源。

自从1978年美国海洋大气局第三代极轨业务化环境卫星系列 TIROS-N 发射成功后,标志着业务化极轨卫星的开端,星上携带的改进的甚高分辨率扫描辐射计(AVHRR)瞬时视场角为 $1.3^{\circ} \times 1.3^{\circ}$ 平方毫弧度,相当于星下点1.1km,每分钟扫描360行,扫描角为 $\pm 55.4^{\circ}$,相当于地面刈幅2800km。NOAA卫星具有时间分辨率高、覆盖面广、成

像面积大、成本低、不受地理条件限制等优点。

NOAA 系列卫星在发展过程中对星上的传感器做了不断的改进,探测器的观测能力也不断提高。NOAA-6 以前的卫星中安装的是 VHRR(甚高分辨率辐射计); NOAA-6 至 NOAA-14 改进了扫描辐射计,称为甚高分辨率辐射计 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)。AVHRR 具有可见光至远红外 5 个通道,每一个通道有不同的波长并记录了当卫星扫描地球表面时相应波长的辐射量。其中通道 1,2 为反照率,通道 3,4,5 为亮温。从 NOAA-15 开始,AVHRR 的通道数由 5 个增加到 6 个,将第三通道分为 3a 和 3b 两个通道,3a 通道的中心波长为 1.6 微米,这一波段对冰、雪的分辨能力较强,3b 通道的中心波长为 3.7 微米,两个通道交替工作,1.6 微米通道在白天工作,3.7 }m 受太阳反射辐射干扰严重,适合于夜间工作。NOAA 气象卫星 AVHRR 资料以其时间分辨率高、覆盖面广、价格低廉等优点广泛应用于各种海洋大气研究中:时间分辨率高有助于捕捉地面快速动态变化信息,如日变化频繁的大气海洋动力现象等,有利于高密度动态遥感研究,也大大增强了获取无云景象的能力。同时,成像面积大,有利于获得宏观同步信息,减少数据处理容量。

NOAA 卫星 AVHRR 传感器的气溶胶反演算法,目前主要有单通道法^[3]和双通道法^{[9][10]}。单通道法利用 AVHRR 第一通道接受的辐射量与气溶胶光学厚度之间近似线性的关系来导出气溶胶光学厚度。

Gordon and Wang^[11]在 CZCS 的基础上,提出了利用 SeaWiFS 传感器两个近红外波段反演气溶胶光学厚度并进行大气校正的算法,算法虽考虑了对多次散射效应的校正,但仍然采用大气分子和气溶胶贡献可以分离这一假设条件。该大气校正算法的建立基于均匀分布的两层平面平行大气系统:其中气溶胶粒子被限制在边界层内,大气分子则分布在气溶胶层之上的水平自由对流层内。算法假设近红外波段 765nm 和 865nm 的离水辐射为 0 (black pixel assumption),根据两个近红外波段气溶胶反射率的光谱变化估测出适合的气溶胶模型和光学厚度。SeaWiFS 传感器自 1997 年发射以来,已经成功地为我们提供了近 10 年尺度全球气溶胶的观测资料。其后的新一代传感器,如美国宇航局 (NASA) 的 MODIS (2002 年至今)、欧洲空间局 (ESA) 的 MERIS (2003 年至今),其气溶胶反演算法基本上都继承了 SeaWiFS 的成功经验,这些传感器将继续为我们提供长时间序列、全球覆盖的气溶胶观测资料,为我们研究我国海区气溶胶时空分布规律及相关应用研究奠定了基础。

1.2 研究意义

本论文的目的和意义就是希望利用现场观测及已有的长时间序列的卫星遥感资料,分析中国海各海区气溶胶的时空分布特性,研究我国每年的沙尘暴、工业大气污染等过程对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。

1.3 研究方法及论文组织

首先利用现场实测资料与卫星资料进行对比印证,在印证的基础上,利用长时间序列的卫星遥感资料(主要是 SeaWiFS 和 Aqua/MODIS),研究我国海区气溶胶的时空分布特性及变化规律;进而探讨气溶胶分布在我国沙尘暴、煤烟等大气污染过程中的应用。

主要包括以下几方面的内容:

- 1、利用现场观测资料对卫星反演资料进行印证;
- 2、利用长时间序列的卫星遥感资料研究我国典型海区(黄海、东海等)气溶胶的月、季分布特性及变化规律;
- 3、分析我国沙尘暴、煤烟等大气污染过程对气溶胶分布的影响。

本论文采用的现场观测资料将包括 ACE-Asia 2001 大型现场调查实验资料、中国 SOLAS 2006 春季黄海航次出海实验、2006 冬季 908 北黄海航次、2006 年冬季 973 东海航次获得的资料以及与国内外合作单位之间交流、共享的资料。卫星遥感资料以 2000-2006 年 7 年尺度的 SeaWiFS 资料为主,采用 NASA 推荐的 SeaWiFS 数据处理软件 SeaDAS 进行处理。其它卫星传感器,如 Aqua/MODIS 作为辅助。首先利用现场实测资料对卫星资料进行印证,在印证的基础上,利用长时间序列的卫星遥感资料,研究我国海区气溶胶的时空分布特性及变化规律;进而分析我国典型沙尘暴、煤烟等大气污染过程对气溶胶分布的影响。

2 大气气溶胶及其卫星遥感反演方法概述

2.1 大气气溶胶及其光学性质

大气气溶胶是指大气与悬浮在其中的固体和液体微粒共同组成的多相体系^[12], 尺度范围从 0.001 微米的分子团到 100 微米的尘埃、云滴, 主要分布在对流层底层(几公里高度内), 粒子浓度随垂直高度的升高一般呈指数下降^[13]。

大气气溶胶的来源很复杂, 按产生过程可分为自然源和人为源。自然源包括岩石和土壤风化、扬尘、海水溅沫以及自然灾害(火山喷发、森林火灾)等; 人为源有工业排放、农作物焚烧排放及汽车尾气排放等; 人为排放的气体污染物在一定条件下通过气-粒转化过程形成气溶胶也是大气气溶胶的一个重要来源。在人类活动的影响下, 大气中人为排放的气溶胶逐年增加^[14]。

气溶胶对气候变化、云的形成、能见度的改变以及人类健康都有重要影响^[15]。气溶胶对气候的辐射强迫影响一方面表现为大气中的气溶胶粒子吸收和散射太阳辐射、地面辐射出的长波辐射, 从而影响地-气辐射收支; 另一方面气溶胶浓度变化影响云的光学特性、云量、云的寿命, 而云的变化反过来影响气候。另外, 气溶胶对能见度的影响主要是通过光的吸收和散射两种途径, 颗粒物散射和吸收消光取决于其大小、形状、湿度、化学成分以及复折射指数, 其中, 黑碳气溶胶对光的吸收作用最为显著。沙尘气溶胶主要是通过散射作用大大降低到达地面的太阳辐射通量。

在海色遥感中, 主要考虑和研究的是如何计算气溶胶粒子对太阳辐射的影响。海色遥感要准确反演各种海色产品的前提就是需要准确的大气校正, 而大气校正的难点就在于要精确计算出时空分布变化很大的气溶胶的辐射贡献, 即气溶胶对太阳光的吸收和散射效应。

2.1.1 气溶胶的主要类型

气溶胶的种类有很多不同的定义, 其中 WMO 在 1986 年定义基本的气溶胶成分有: 类尘埃粒子、水溶性粒子、海盐粒子、煤烟粒子、75% H_2SO_4 液滴和火山灰粒子。类尘埃粒子不同于沙漠气溶胶粒子, 一般用来代表中纬度的土壤性质。海洋粒子则是出风的作

用在海面生成海水飞沫蒸发形成, 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模型。这些基本成分的不同混合构成了不同的气溶胶类型, 一般可以分为大陆、海洋和背景气溶胶三种。而根据国际气象与大气物理协会 (LAMAP) 定义的标准辐射大气 (SRP) 中的气溶胶模型, 气溶胶在对流层由水溶性、沙尘性、海洋性、煤烟性四种基本气溶胶组成, 根据这四种组分不同百分比含量, 将气溶胶定义为大陆型、城市工厂型、海洋型三种基本模型^[16]。

2.1.2 气溶胶的主要表征参数

气溶胶的基本光学参数包括尺度分布、光学厚度、折射率、单次散射反照率等, 面分别介绍一下:

(1) 气溶胶粒子的尺度谱分布

气溶胶粒子的尺度谱分布 $n(r)$ 大致有四种 [Vermote 1997, 110-160]: 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^[17],

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

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:

$$n(r) = cr^{-(v+1)} \quad (2-2)$$

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) 气溶胶的光学厚度

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,

$$\tau_A(\lambda, z) = \alpha \lambda^{-\beta} \quad (2-3)$$

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 $1 \mu m$ 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^[18]。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。

(3) 单次散射反照率 (ω) 和折射指数

当光子与粒子相碰撞时, 将产生吸收和反射, 所以一般用单次散射反照率 (ω) 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:

$$\omega = K_s / (K_s + K_a) \quad (2-4)$$

式中 K_s 、 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^[19]。 ω 的变化对地球上的太阳辐射平衡有重要的影响, ω 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。

当大气中粒子的直径与辐射的波长相当时发生米氏 (Mie) 散射。当粒子的尺度很小而达到分子尺度时, Mie 理论退化为 Rayleigh 理论。Mie 散射的散射强度随角度的分布十分复杂, 方向性比较明显。这种散射主要由大气中的微粒, 如烟、尘埃、小水滴及气溶胶等引起。Stewart^[20]和金亚秋^[21]详细地介绍了米氏散射理论。在可见光波段, 除了对于大气分子可用瑞利散射理论, 对于其他粒子必须使用米氏理论。

2.1.3 吸收性气溶胶的光学性质

吸收性气溶胶主要是指对太阳辐射有强烈吸收的气溶胶。最具代表性的就是沙尘气溶胶 (或称黄沙气溶胶) 和煤烟气溶胶 (或称黑碳气溶胶)。气溶胶的吸收导致地面吸收的太阳辐射大幅下降, 从而对蒸发、地气潜热和感热通量产生影响, 进而影响水分循环。

黑碳气溶胶是大气气溶胶中的一种重要组成部分, 主要是含碳物质不完全燃烧产生

的不定型碳质，其颗粒尺度范围一般在 0.01-1 微米。它具有较宽的光学吸收波段和较强的光学吸收特性，是仅有的有着较大吸收截面积的人为气溶胶，也是大气中首要的吸收性气溶胶，对可见光和红外辐射均有强烈的吸收作用。黑碳气溶胶在光学性质上与气溶胶其他组分有很大差别，同温室气体相比，它具有更宽的吸收波段，同具有相同性质的其他颗粒物如沙尘等相比，其质量吸收系数要大两个数量级^[14]。

而沙尘气溶胶也称为矿物气溶胶，是对流层气溶胶的主要成分，其光学厚度相对黑碳较大一些。全球沙尘主要来自撒哈拉沙漠、美国西南部沙漠和亚洲地区。沙尘在大气化学、生态以及地球能量平衡中起到非常重要的作用。沙尘与地球辐射系统的相互作用比其他气溶胶更复杂，这是由于沙尘既能吸收又能反射太阳和红外辐射，因而在不同条件下对气候产生加热或冷却作用。有关沙尘气候强迫的估计存在较大的不确定性，甚至其强迫的正负号也没有确定，其间接效应的不确定性更大^{[22][23]}。

2.2 SeaWiFS 大气气溶胶反演算法

在表征大气气溶胶的参量中，光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)是最重要的物理量之一，是推算气溶胶含量、评价大气环境污染程度、研究气溶胶辐射气候效应的一个最关键的因子。

气溶胶光学特性的遥感方法主要包含两个方面，一是地基遥感，二是卫星遥感。气溶胶的地基遥感主要利用一些辐射计如太阳分光光度计、多波段光度计、太阳直接辐射计、太阳总辐射计、华盖计等以及激光雷达的探测来反演气溶胶的光学特性，当然不同仪器资料的反演理论和方法各有不同，也都处于不断地发展改进中。

气溶胶地面观测是通过太阳光度计或者激光雷达实现的，由于仪器价格昂贵，对仪器的性能和观测要求也比较高，不可能建立强大的观测网，难以对气溶胶的分布特点做分析，所以发展卫星遥感的方法是做气溶胶全球大范围分布特征分析唯一有效的手段。另外，随着卫星气象学的发展，卫星探测手段和技术的不断提高，卫星遥感理论和方法的不断进步，获得越来越准确的全球范围或者是区域范围的气溶胶性质也成为可能。同时，大量的卫星数据资料更为我们提供了用卫星遥感方法获取气溶胶物理性质的强大支撑。卫星遥感是探测全球大范围气溶胶分布的唯一有效手段，有助于我们全面了解气溶胶各种参数的全球定量分布信息。

卫星遥感气溶胶的理论研究始于七十年代中期，1977年NOAA开始利用AVHRR可见光第一通道(0.63 μ m)进行海洋上空气溶胶光学厚度的遥感，目前已发展到了第二代反演

方法,利用双通道遥感的第三代反演方法也正在研究过程中。现在利用AVHRR可见光通道遥感海洋上空气溶胶已作为NOAA的业务运行,每周提供一次全球海上气溶胶光学厚度分布图,用来分析全球海上气溶胶的分布特性。近年来,随着对气溶胶特性认识的不断深入,利用卫星遥感气溶胶得到了不断的发展,各种传感器包括多光谱、多角度、偏振、成像扫描等功能的应用将对遥感气溶胶光学特性提供更加全面的信息。

2.2.1 卫星遥感气溶胶的研究进展

卫星遥感气溶胶的理论基础是辐射传输。依据各个卫星传感器的不同特性,基于单通道、多通道、多角度、对比度降低和极化等观测资料和技术的气溶胶反演方法已经被开发出来,并得到了广泛的应用。下面对这些方法做一简单介绍。

1) 单通道算法

这是最早的卫星遥感气溶胶的反演算法。单通道算法反演气溶胶的物理依据是:当地表反射率很小时,对卫星所测表观反射率起到贡献的因子按大小依次为气溶胶散射、分子散射和地表反射,对于吸收性气溶胶,暗背景下气溶胶对反射比的贡献与气溶胶光学厚度成线性关系,即使对于气溶胶光学厚度比较大、多次散射不能被忽略的情况下也依然成立。根据这一原理发展起来的NOAA业务运行的单通道算法已经成功的描述了全球海上平流层和对流层气溶胶光学厚度的分布。

2) 多通道算法

利用气溶胶特性在不同通道的显著差别,比较某些通道反射比的比值(称为“颜色比”),也可得到反映气溶胶信息的相关参数,如Durkee^[24]利用AVHRR在通道1(0.630 μm)和通道2(0.830 μm)的资料估算了颜色比和气溶胶光学厚度;Higurashi等^[25]用AVHRR的通道1和通道2的资料、Mie散射理论和幂指数粒子谱分布,得到了洋面上的气溶胶光学厚度和Angstrom指数;Tanre等^[26]利用MODIS资料多通道反射率法计算了海洋上气溶胶的特性。

3) 暗背景法

Kaufman等^[27]研究发现,在非常清洁的大气条件下,绿色植被表面的反射率在红、蓝和2.2 μm 通道有相似的图像,表明他们之间存在着一定的关系,由于可见光通道的图像仅受气溶胶散射的影响,而2.2 μm 通道的图像不受气溶胶的影响的,反映的是地面的特征,气溶胶层下方的植被覆盖区的地表的红、蓝通道的反射率可以从2.2 μm 通道的反

射率估算出来,所测得红、蓝通道的表观反射率和利用 2.2 μm 通道估算出来的地面反射率之间的差异就是气溶胶的影响,利用这一事实依据开发出的反演气溶胶的方法适用于密集植被暗背景地区,因此又称 DDV (Dense Dark Vegetation)算法。NASA 的 EOS 计划的第一颗卫星 Terra 所载传感器 MODIS 反演气溶胶的业务算法就是基于这些基本概念。

4) 结构函数法

简单说其基本依据是相邻像素点反射率的差随光学厚度的增加而下降。目前这一方法只能应用于相邻时间观测的一组图像。Holben 等^[28]对这一方法也做了详尽的论述。Tanre 等^[26]应用这一方法分析研究了撒哈拉沙漠气溶胶光学厚度,1992 年又用这一方法反演了陆地气溶胶的光学厚度。

5) 海陆对比算法

通过不同的地表对比或者不同的气溶胶总量(清洁日和污浊日)的对比,可以反演气溶胶的光学厚度和单次散射反照率,如利用 MSS 的 80m 分辨率的卫星图像来反演海岸地区气溶胶的光学厚度和单次散射反照率^[29],也曾被应用到 AVHRR 数据反演烟雾和工业污染^[30]。

6) 多角度成像偏振反演

多光谱对比观测的角度变化对气溶胶模型的敏感性是进行多角度观测反演陆地气溶胶模型的理论基础。Terra 卫星携带的 MISR 传感器是一个多角度成像光谱仪,可以提供 9 个不同方向的观测。偏振是对于气溶胶微物理特性尤其是气溶胶有效粒径和折射指数比较敏感的特性,被用在气溶胶遥感领域涉及新型传感器。除了可反演气溶胶的物理特性外,极化观测的另外一个优势是极化矢量比总辐射对地表反射要不敏感得多。偏振光遥感的理论难点在于实际气溶胶粒子一般都是非球形和各向异性,远离球形粒子各向同性的偏振特性;另外就是地面也同样存在极化特性。1996 年发射的 ADEOS 卫星携带的 POLDER 传感器及 2002 年发射的 ADEOS-II 卫星携带的 POLDER-II 传感器,在它们的 8 个通道中的 3 个提供了极化观测。

7) 热辐射对比法

这个方法充分利用了中红外波段提供的信息,主要应用在干旱和半干旱地区有很好的结果,在撒哈拉沙漠气溶胶研究中发挥了较大的作用。Ackerman 用这一方法研究了火山和土壤气溶胶的遥感监测。Kmoshita 等利用这个方法用 AVHRR 资料研究了 1997-2000 年亚洲沙尘暴过程。因此使用 8.5 μm , 11 μm , 12 μm 通道的亮温数据反演气溶胶光学厚度是可行的,这个方法的优势在于即使是在夜间也仍然可以得到气溶胶反演的结果。

8) 紫外方法

近紫外数据的反演技术所包含的优势是利用红外和可见光遥感所不具备的:

1) 地表反照率在近紫外波段比较低, 即使对于一般情况下比较“亮”的沙漠也比较低, 使得这种反演技术可以用于陆地包括沙漠地区, 成为监测沙尘暴的有效工具。

2) UV 波段对气溶胶类型较大的敏感性, 使得依赖这种遥感方式可以将含碳类气溶胶和矿石类气溶胶从理想散射粒子类气溶胶如硫酸盐和海盐清晰的区分开来。由 TOMS 反演的 UV 波段吸收类气溶胶光学厚度得到了 NASA 的气溶胶地基观测网 (Aerosol Robotic Network-AERONET) 的验证。

综上所述, 卫星遥感对流层气溶胶的方法已经从单通道发展到多通道、多角度成像偏振, 从气溶胶光学厚度单变量反演向气溶胶光学厚度、粒子大小分布、折射指数、数浓度和气溶胶类型等多变量反演发展, 为更加全面、深入、细致的研究气溶胶提供了丰富的信息和广阔的前景。

2.2.2 SeaWiFS 大气气溶胶光学厚度反演算法

美国国家宇航局 (NASA) 于 1997 年 9 月成功发射海洋水色卫星 (SeaStar), 星上装载海洋宽视场扫描仪 (SeaWiFS)。SeaWiFS 在可见与近红外有 8 个波段 (0.412, 0.443, 0.490, 0.510, 0.550, 0.670, 0.765, 0.865 μm), 通道带宽 10nm, 星下点地面分辨率 1.1km。入射至海面的太阳辐射射入海水, 一部分被海水吸收或直接反射, 透射入水的太阳光经水分子、浮游生物、悬浮微粒等散射, 其中一部分由水面反射出来, 这部分称为离水辐射率。卫星接收的这部分信息只占总信息的 10% 左右, 而绝大部分是大气信息。而在陆地上空随地面类型的不同, 遥感器接收的总信息中所占的地面信息对不同的波段有较大的变化, 但大气信号相对较小。

海洋型气溶胶一般能很好地符合 Junge 谱分布, 且光学厚度通常较小; 清洁海水的吸收系数在可见光波段较小而在近红外区较大, 在近红外光谱区离水辐射可近似为零。对于 I 类水体的大气校正 Gordon 提出基于清洁水体的概念, 指出在较清洁的大气条件下单次散射假定与清洁水体概念对于反演海洋上空的气溶胶光学厚度的精度在 10% 以内。我们这里简单介绍一下 Gordon 和 Wang^[31] 提出的 SeaWiFS 气溶胶光学厚度的反演方法。

大气校正的目的就是消除大气吸收和散射的影响, 获得海面向上光谱辐亮度。根据大气-海洋辐射传输理论, 卫星传感器接收到的总辐射量可以表示为:

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_o(\lambda) + L_{ra}(\lambda) + tL_w(\lambda) + TL_g(\lambda) + tL_f(\lambda) \quad (2-5)$$

其中, $L_t(\lambda)$ 是传感器接收到的总辐射; $L_r(\lambda)$ 来自大气瑞利散射; $L_o(\lambda)$ 为大气气溶胶散射; $L_{ra}(\lambda)$ 为大气分子与气溶胶之间的多次散射; $L_w(\lambda)$ 为来自水体的辐射, 即离水辐射度; $L_g(\lambda)$ 为直射太阳光的镜面反射, T 是光束透过率; $L_f(\lambda)$ 为白帽的贡献; t 为海面到卫星传感器之间的大气传递衰减系数 (即大气漫射透过率)。这里忽略了来自海底的反射辐亮度, 因为通常认为可见光不可能到达海洋底部。

1980 年 Gordon 等人第一次将基于单次散射理论的大气校正方法用于 CZCS 的图像处理, 在单次散射模式下, 气体分子与气溶胶之间相互作用项可以忽略, 气体分子和气溶胶粒子的贡献可以分离计算。这种假设在瑞利散射和气溶胶光学厚度小的时候是成立的。在一类水域, 用该模式进行大气校正后所得的离水辐亮度与船测资料相比, 平均误差约为 10%。

随着海色遥感的不断发展及第二代水色传感器的要求, 在 CZCS 算法的基础上, Gordon 和 Wang 提出了针对 SeaWiFS 传感器波段特性的大气校正算法。该算法考虑了气溶胶的多次散射效应, 计算瑞利散射时考虑了极化和不同风速的影响。算法中建立了基于均匀分布的两层平面平行大气系统: 其中气溶胶粒子都在边界层内, 而大气分子都分布在气溶胶层之上的水平自由对流层内。算法中引入了一组 (12 个) 气溶胶模型, 如表 2.1 所示。

表 2.1 SeaWiFS 的 12 个气溶胶模型

模型名称	气溶胶模型类型	粒子数混合比 [%]		相对湿度 [%]
		对流层粒子 (TP)	海盐粒子 (OC)	
O99	Oceanic	0.0	100.0	99
M50	Maritime	99.0	1.0	50
M70	Maritime	99.0	1.0	70
M90	Maritime	99.0	1.0	90
M99	Maritime	99.0	1.0	99
C50	Coastal	99.5	0.5	50
C70	Coastal	99.5	0.5	70
C90	Coastal	99.5	0.5	90

C99	Coastal	99.5	0.5	99
T50	Tropospheric	100.0	0.0	50
T90	Tropospheric	100.0	0.0	90
T99	Tropospheric	100.0	0.0	99

Gordon 和 Wang 的大气校正算法框图如图 2.1 所示:

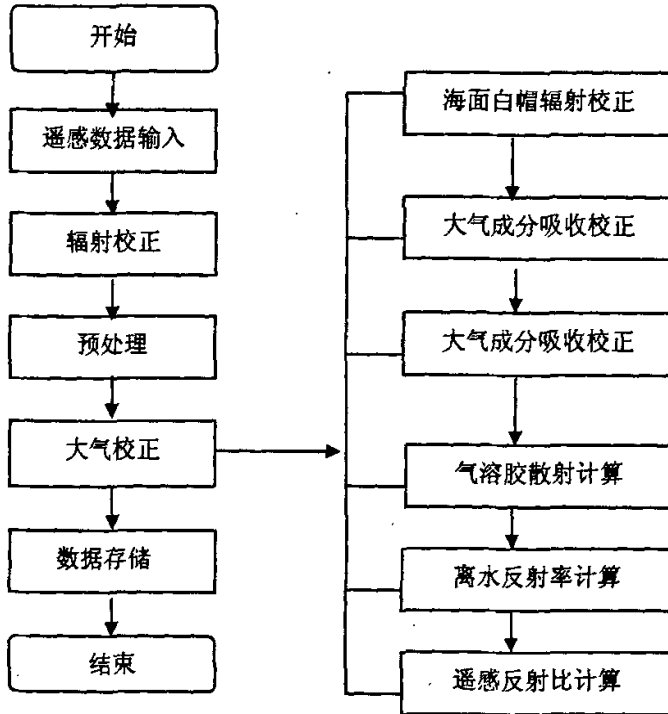


图 2.1 Gordon 和 Wang 的大气校正算法框图

Gordon 和 Wang 的大气校正算法已成为一类水体的较为成熟的业务化算法。算法的核心思想就是采用“暗像元”假设 (black pixel assumption), 即假设近红外波段离水辐射为零。对 SeaWiFS 来说, 就是假设 765nm 和 865nm 波段离水反射率为零, 得出这两个近红外波段气溶胶的贡献, 然后通过适当方法外推到可见光波段, 从而得到可见光波段的气溶胶辐射通量。

根据反射率的定义:

$$\rho = \frac{\pi L}{F_0 \cos \theta_0} \quad (2-6)$$

其中, ρ 是反射率, L 是辐亮度; θ_0 是太阳天顶角; F_0 是地球外辐照度。除去耀斑和白

帽的影响后，式(2-5)就可以转化为下式：

$$\rho_i(\lambda) = \rho_r(\lambda) + \rho_a(\lambda) + \rho_{ra}(\lambda) + t\rho_w(\lambda) \quad (2-7)$$

其中， ρ_i 是大气顶(TOA)总的反射率，可以由传感器测得； ρ_r 是瑞利散射反射率，可以通过NOAA提供的辅助数据精确计算得到； ρ_a 是气溶胶散射反射率； ρ_{ra} 是大气分子和气溶胶相互作用的反射率； ρ_w 是离水反射率。

假设近红外波段(即765nm和865nm)离水反射率 ρ_w 为零，则由式(2-7)就可以得到这两个波段的气溶胶多次散射反射率 $\rho_a + \rho_{ra}$ ，再根据事先计算出来的12个气溶胶模型单次散射 ρ_{as} 与 $\rho_a + \rho_{ra}$ 的关系(利用气溶胶模型及辐射传输方程计算并存在查找表LUT中)，得到12个模型的单次散射 $\rho_{as}(765)$ 和 $\rho_{as}(865)$ ，计算两者的比值即得到12个 $\varepsilon_i(765,865)$ ，由这12个 $\varepsilon_i(765,865)$ 求得一个平均值 $\varepsilon(765,865)$ ：

$$\varepsilon_i(765,865) = \frac{\rho_{asi}(765)}{\rho_{asi}(865)} \quad (2-8)$$

$$\varepsilon(765,865) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(765,865) \quad (2-9)$$

这里 $\varepsilon(765,865)$ 必定落在某两个模型的 ε 之间，对于其他可见光波长 λ_i ，根据这两个气溶胶模型的 ε 值进行内插即可获得 $\varepsilon(\lambda_i,865)$ 。然后，根据选定的两个气溶胶模型对应的 $\rho_{as}(865)$ 和 $\varepsilon(\lambda_i,865)$ ，就可以计算得到这两个模型对应的单次散射反射率 $\rho_{as}(\lambda_i)$ ，再利用模型的 $\rho_a + \rho_{ra}$ 与单次散射反射率 ρ_{as} 的对应关系，得到两个气溶胶模型对应的 $\rho_a(\lambda_i) + \rho_{ra}(\lambda_i)$ ，通过内插，最终得到该波长的气溶胶多次散射反射率 $\rho_a + \rho_{ra}$ 。对遥感图像的像元逐个修正，就可以得到离水反射率，完成大气校正过程。从选出的两个模型对应的单次散射反射率 $\rho_{as}(\lambda_i)$ ，再利用模型查找表中单次散射反射率 ρ_{as} 与气溶胶光学厚度 τ 的对应关系，即可得到两个气溶胶模型分别对应的 τ ，通过内插，最终得到该波长的气溶胶光学厚度 τ 。

气溶胶光学厚度作为海色遥感的标准产品之一，已进行了广泛的印证，并NASA对外发布。

3 大气气溶胶现场测量及卫星遥感方法

3.1 现场测量仪器及测量结果

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。

3.1.1 仪器结构及主要参数

我们本文所用的资料就是用日本 PREDE 公司的船用天空辐射计 POM-01MKII 在不同航次中获得的。PREDE 公司的船用天空辐射计 POM-01MKII 的主要构成如图 3.1 所示：

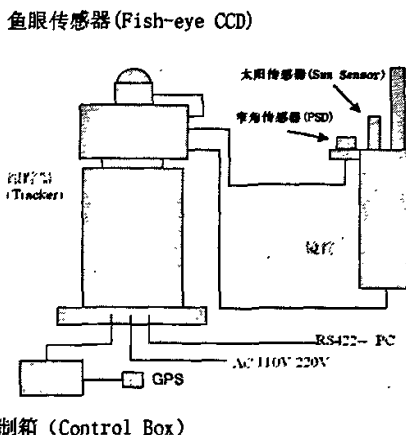


图3.1 日本PREDE公司的船用天空辐射计POM-01MKII结构框图

仪器的主要参数和技术指标如下:

光学部分

□测量波长: 315nm, 400nm, 500nm, 675nm, 870nm, 940nm, 1020nm

监测通道0为暗(dark)通道

□半宽度(HBW): 约10nm

□截止阈: 0.1%以下

□最小可测角: 3°

电子学部分

□传感器: 硅光二极管(浜松电子产S1336-5BQ)

□动态范围: 2.5mA, 250 μ A, 25 μ A, 2.5 μ A, 250nA, 25nA, 2.5nA

□温度控制: 40°C(干涉滤光片及传感器的温度控制)

驱动部分

□驱动方法: 步进电机(方位角、高度角的2轴)

□分辨能力: 0.0036°

□回转角: 方位角 $\pm 310^\circ$, 高度角 $-20^\circ \sim +150^\circ$

□传感器: 4个光二极管

鱼眼传感器(CCD相机): 输出视频信号, 视角120°

窄角传感器(PSD): PSD位置探测素子(2次元)

电源: AC85~132V / 170~264V 47~440HZ

观测用软件: Windos2000/Windows XP操作系统

通讯方法: RS-422

3.1.2 仪器测量原理及反演方法简介

本仪器通过观测7个波段太阳直达光及周围漫射光强度,来推算大气气溶胶的厚度及粒度分布等特性。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。特别是此MK II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。图3.2给出了仪器工作时的测量画面。

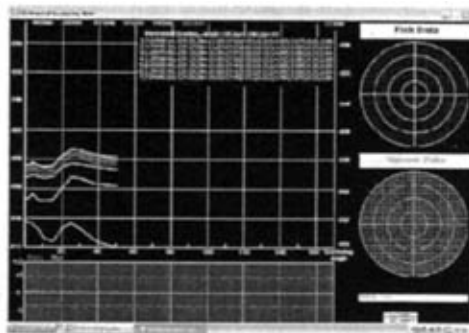


图3.2 仪器工作时的测定画面

仪器测量不同波长、不同太阳高度角太阳直射光及周边天空散射光的强度，然后利用日本东京大学开发的数据处理软件 Skyrad.pack (Ver. 4.2) 对采集的原始数据进行处理，可反演的大气参数包括：观测及反演得到的辐亮度；各波段的气溶胶光学厚度、折射率及单次散射反照率；气溶胶粒度分布体积谱($dV/d\ln r$)及相位函数。仪器详细的工作原理、反演算法及应用见参考文献[1-5]。

3.1.3 测量结果

我们使用的PREDE天空辐射计是海、陆两用型，既可以进行陆地定点自动观测，也可以安装在船上进行海上现场观测。

(一) 陆地定点观测结果

没有出海计划时，PREDE天空辐射计安装在中国海洋大学逸夫科技馆五楼顶进行无人值守连续、自动观测。仪器安装位置及状态见图3.3。



图3.3 PREDE天空辐射计在逸夫科技馆五楼顶的安装位置及状态

仪器自2006年5月24日至2006年10月20日进行了约5个月的连续观测，获得了大量数据。图3.4给出的是2006年8月16日不同时刻的观测结果。可以看出，即使在一天内，在

不同的时刻，由于陆地上大气气团的变化迅速，气溶胶的观测结果也有较大的变化。其中单次散射反照率较小的观测对应的是吸收性的大气污染物，如煤烟、沙尘等。

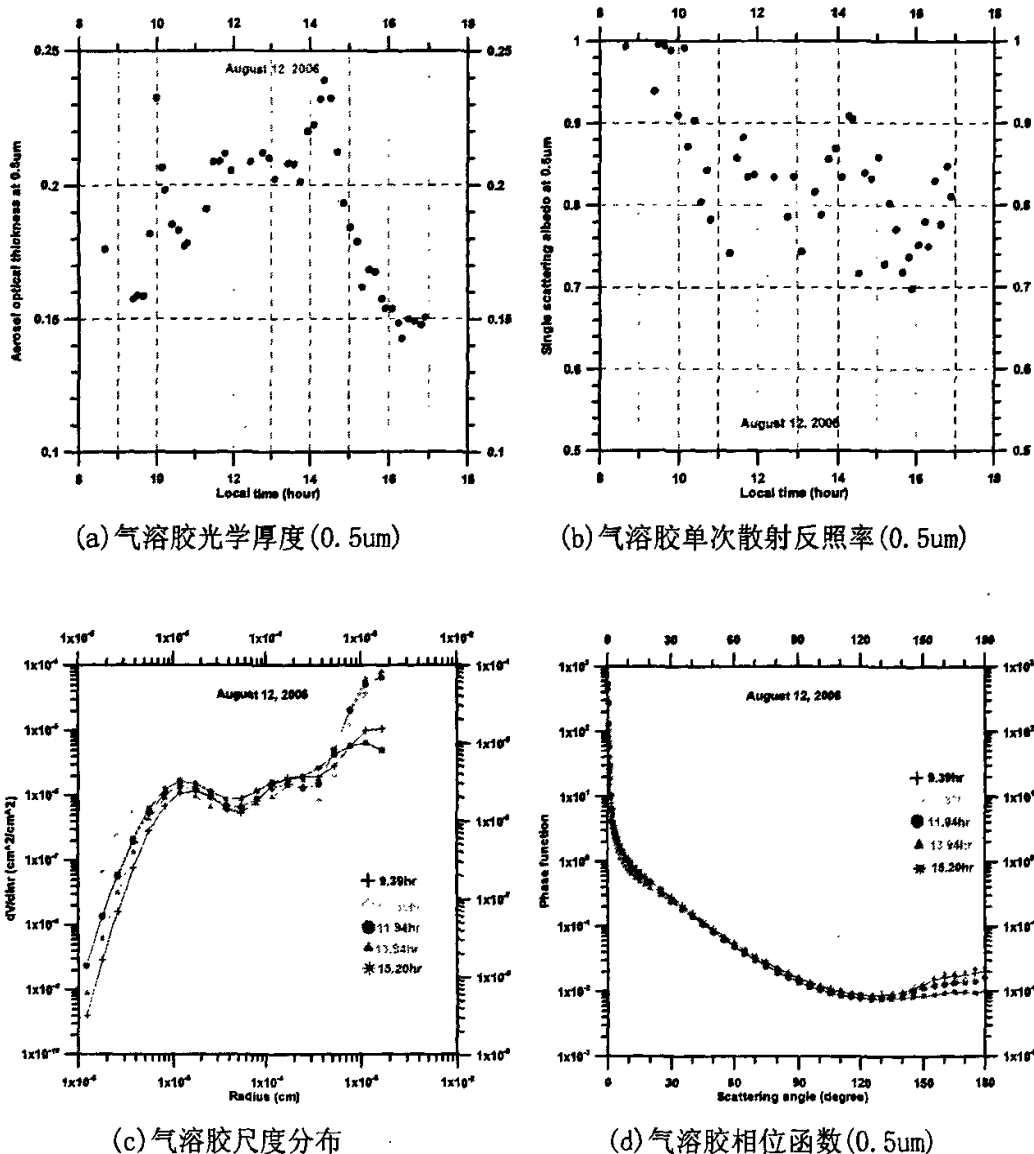


图3.4 PREDE天空辐射计2006年8月16日不同时刻的观测结果

图3.5给出了仪器长时间序列的观测结果（2006年5月24日-10月13日）。

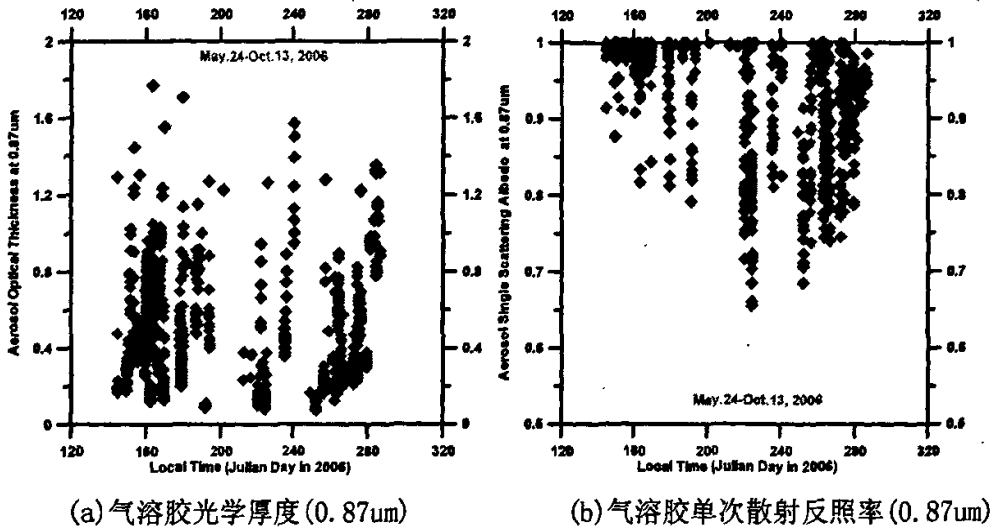


图3.5 PREDE天空辐射计2006年5月24日-10月13日期间的观测结果

从图3.5可以看出，陆地上气溶胶的光学厚度及单次散射反照率的变化范围较大，这也从一定程度上反映了城市大气污染的情况。

(二) 海上现场观测结果

PREDE天空辐射计已经参加了三次现场实验，获得了大量宝贵的有关我国海区海上气溶胶的现场观测资料，为了解我国海上气溶胶的性质及其对气候的影响效应奠定了基础，也为国内外海色卫星产品的印证提供了重要的依据。

1. 2006年4月 SOLAS春季黄海航次

时间为2006年4月17日至4月29日，海域为黄海；站位信息及航线图如图3.6所示。

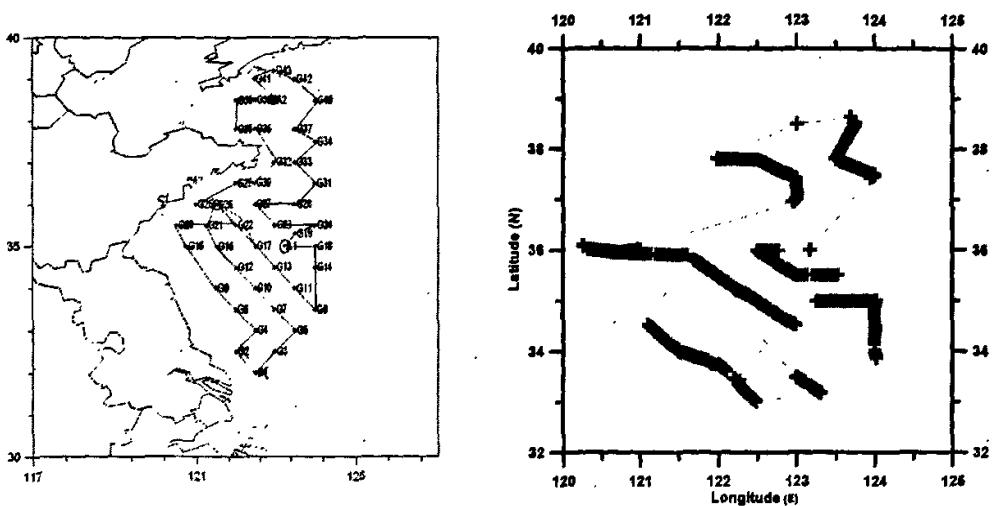


图3.6 2006年4月 SOLAS春季黄海航次站位信息及航线图

首先给出本航次中几个典型站位的观测示例。

1) 2006年04月17日12.54hr, 120.26E, 36.09N, G25 站位, 结果如图3.7。

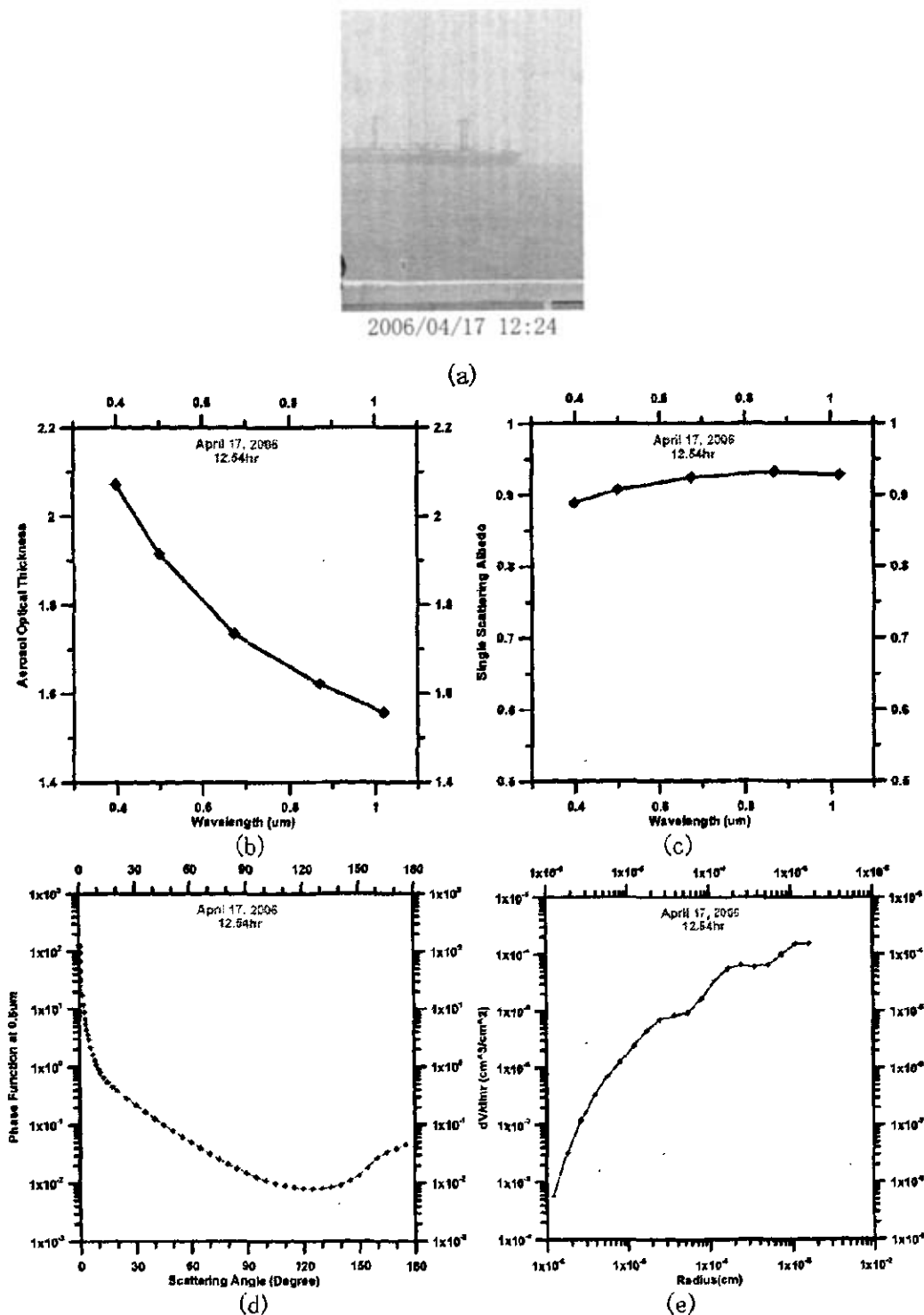


图3.7 2006年04月17日12.54hr G25 站位观测结果

(a)天气及海况 (b)气溶胶光学厚度 (c)单次散射反照率 (d)相位函数 (e)尺度分布

G25 站位位于青岛港锚地，近岸，大气污染较严重。太阳淡，有阴霾。初春季节，可能存在吸收性气溶胶（如煤烟）。阴霾对反演结果会有影响。

2) 2006 年 04 月 22 日 13.88hr, 122.69E, 35.82N, G27 站位至 G23 站位，结果如图 3.8。

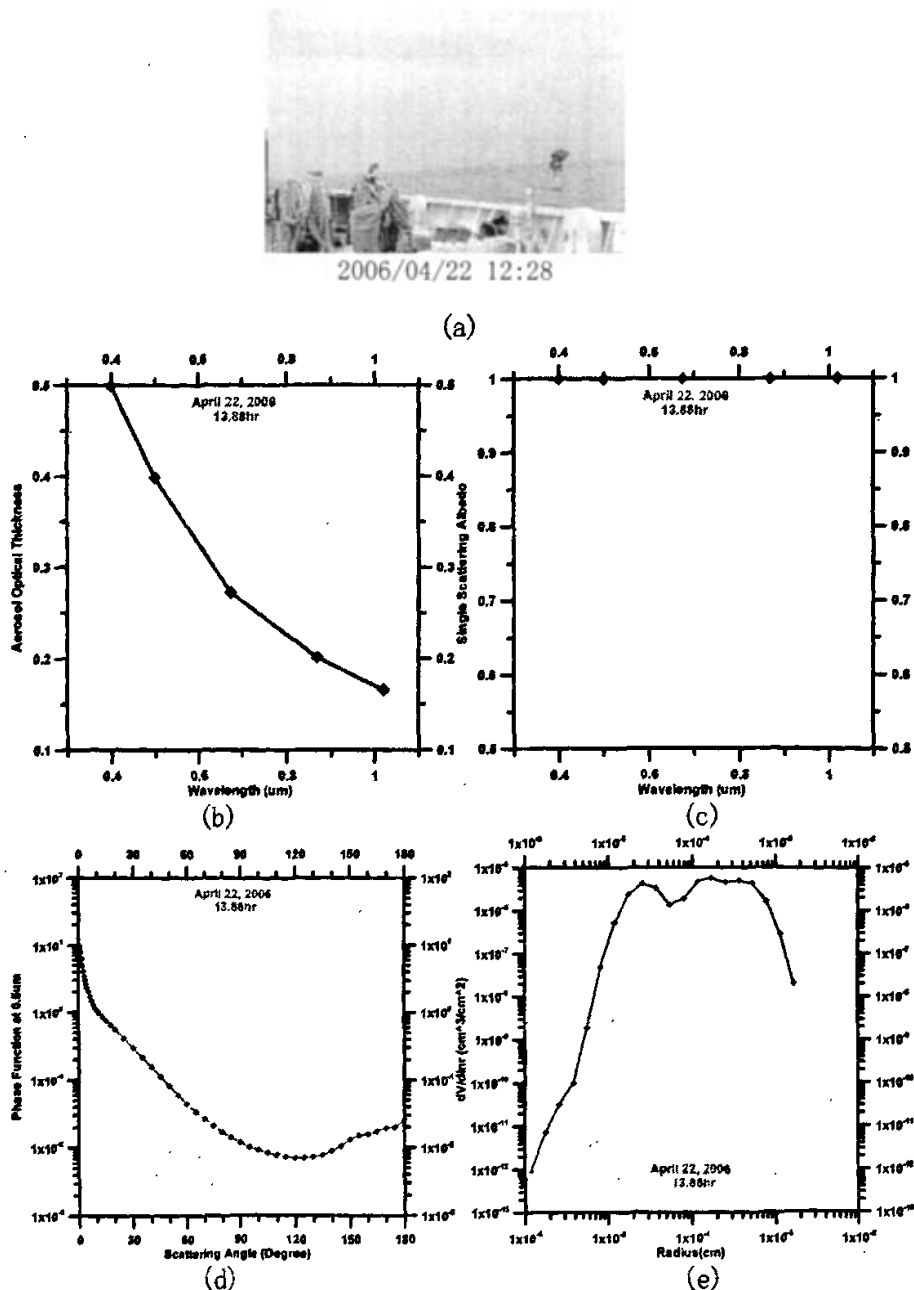


图 3.8 2006 年 04 月 22 日 13.88hr G27 站位至 G23 站位观测结果
(a)天气及海况 (b)气溶胶光学厚度 (c)单次散射反照率 (d)相位函数 (e)尺度分布

G27 至 G23 站位离岸较远，比较清洁的大气，基本上不受陆源气溶胶的影响。有云、

有时遮住太阳过渡到晴朗、无云。

3) 2006年04月25日 8.78hr, 122.65E, 34.85N 及 10.57hr, 122.49E, 35.01N, G17 站位, 结果如图 3.9。

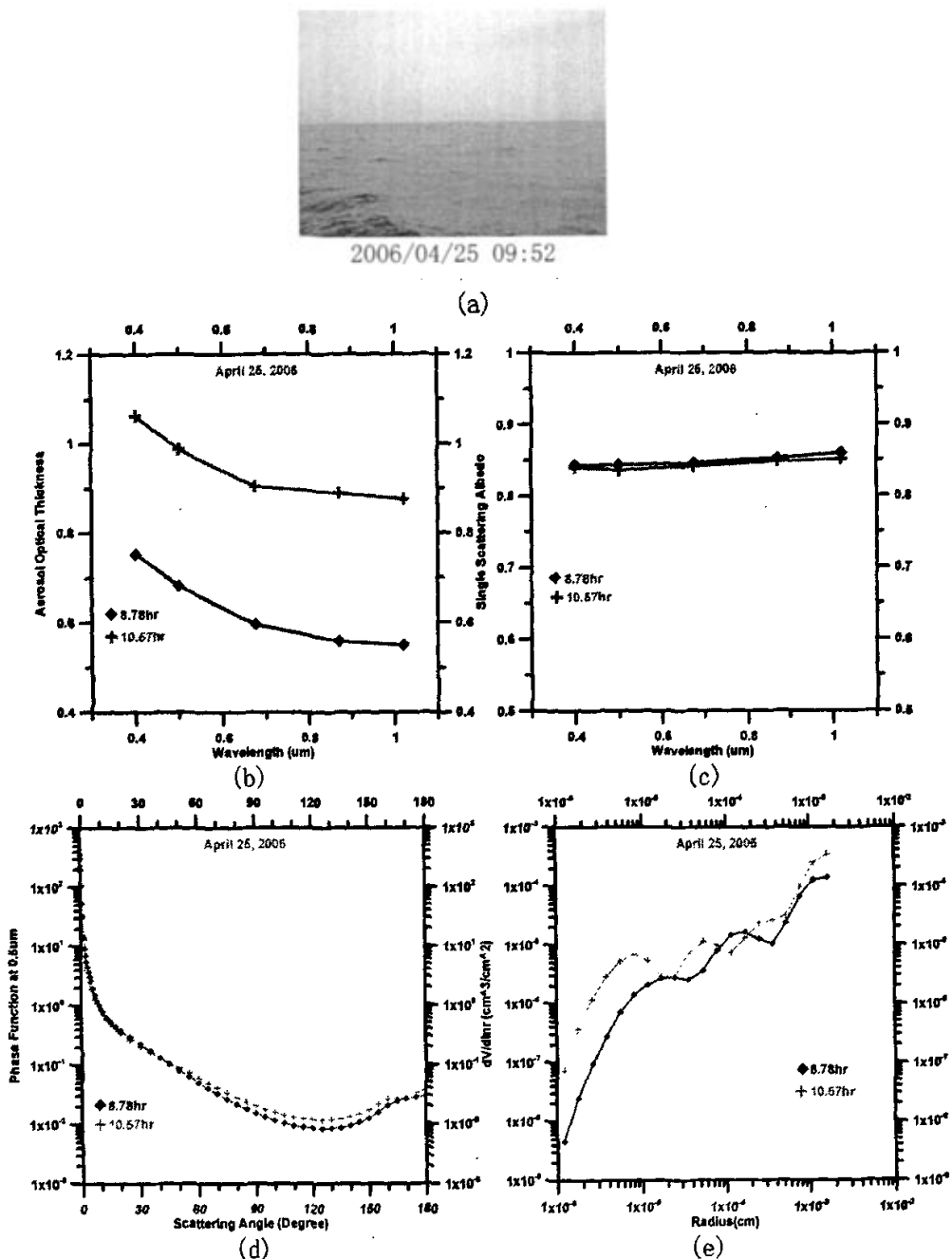


图 3.9 2006年04月25日 8.78hr 及 10.57hr G17 站位观测结果

(a)天气及海况 (b)气溶胶光学厚度 (c)单次散射反照率 (d)相位函数 (e)尺度分布

G17 站位离岸较远, 但本日可能有一次沙尘过程, 大粒子较多, 吸收性较强。晴,

有云覆盖，有阴霾，能见度一般，阳光淡。

本航次的气溶胶光学厚度的观测结果如图3.10所示。可以看出，春季黄海气溶胶光学厚度较大，在经度方向，随着离岸距离的增大呈减小的趋势。另外，海区上空的霾层使得气溶胶的光学厚度明显增大。

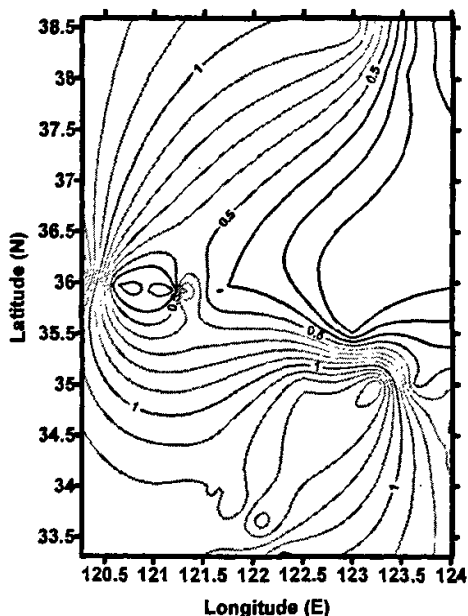


图3.10 2006年4月SOLAS春季黄海航次0.87 μm 气溶胶光学厚度分布图

2. 2006年12月908冬季北黄海航次

时间为2006年12月29日至2007年1月14日，海域为北黄海。站位信息及航线图如图3.11所示。

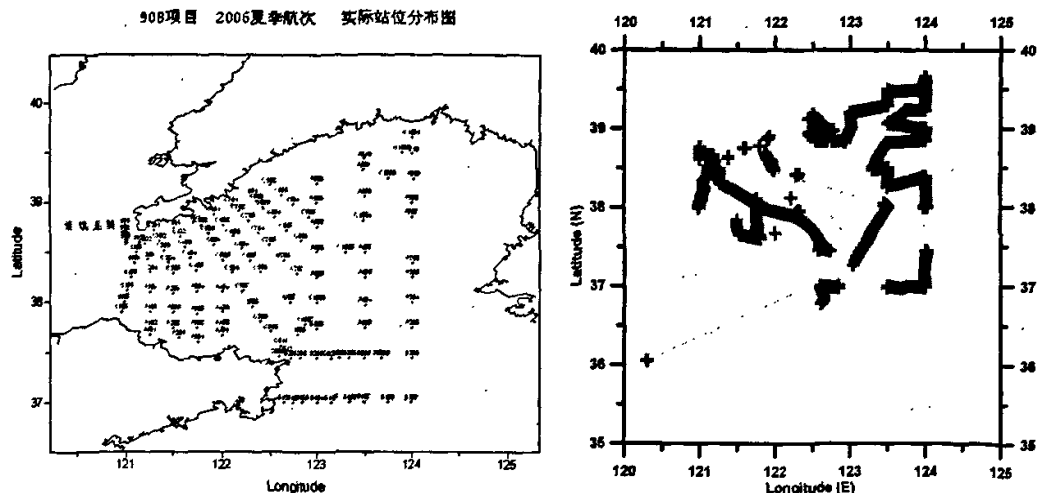


图3.11 2006年12月908冬季北黄海航次站位信息及航线图

本航次的气溶胶光学厚度的观测结果如图3.12所示。可以看出，冬季北黄海气溶胶

光学厚度比春季明显减小，在经度方向，随着离岸距离的增大仍然呈减小的趋势。

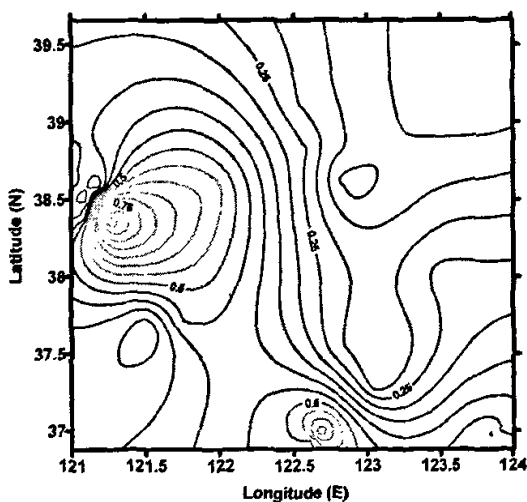


图3.12 2006年12月908冬季北黄海航次0.87 μm 气溶胶光学厚度分布图

3. 2007年1月973冬季东海航次

时间为2007年1月22日至2月14日，海区为东海，站位信息及航线图如图3.13所示。

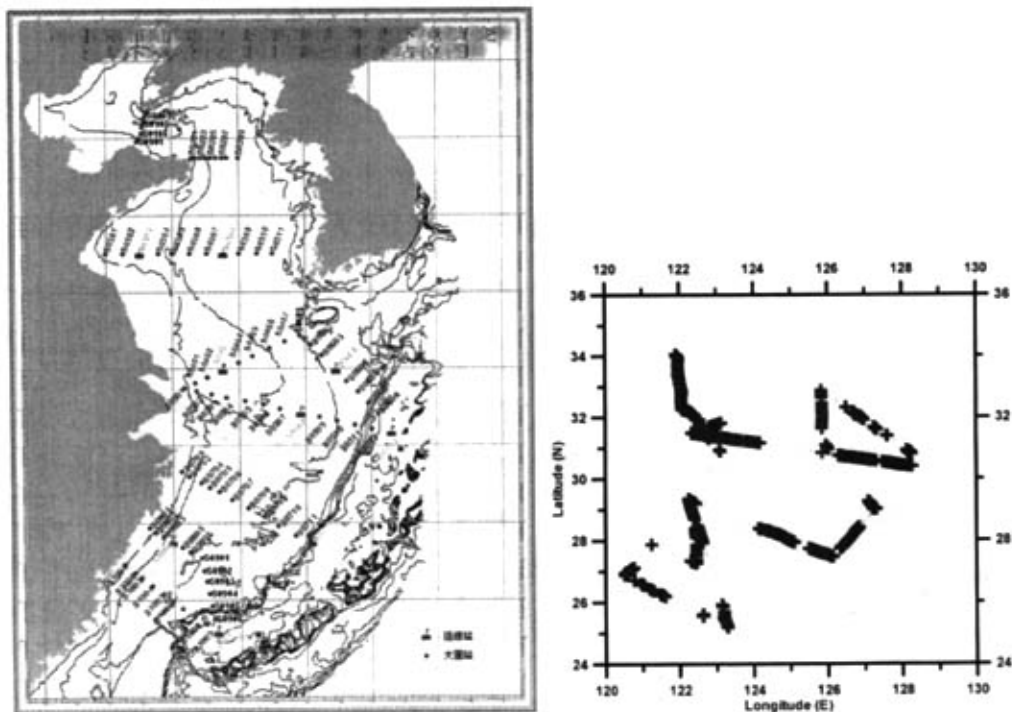


图3.13 2007年1月973冬季东海航次站位信息及航线图

本航次的气溶胶光学厚度的观测结果如图3.14所示。可以看出，冬季东海气溶胶光学厚度比黄海小，在经度方向，没有明显的变化趋势，而在纬度方向，随着纬度的增加

呈增大的趋势。

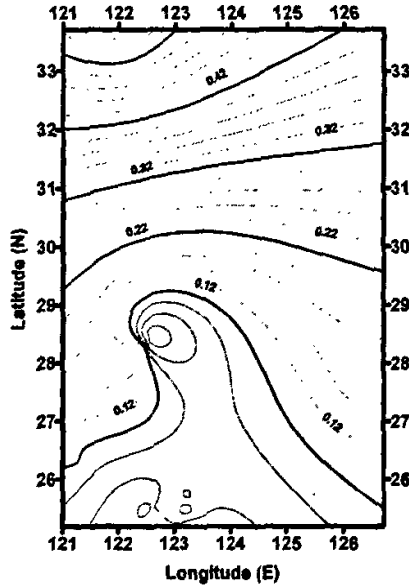


图3.14 2007年1月973冬季东海航次0.87 μm 气溶胶光学厚度分布图

3.2 卫星遥感反演结果

本论文采用卫星资料是基于美国国家宇航局 (NASA) 提供的公开资料, 是在海色时间序列计划 (The Ocean Color Time-Series Project) 的框架下提供的。我们采用的是海洋生态处理小组 (The Ocean Biology Processing Group: OBPG) 提供的SeaWiFS卫星传感器和Aqua/MODIS卫星传感器融合的全球9-km月平均产品 (OBPG SeaWiFS / Modis_Aqua Monthly Global 9-km Products), 地球物理参数是大气气溶胶光学厚度 (其中SeaWiFS对应865nm, Aqua/MODIS对应869nm), 时间尺度是2000年至2006年共7年, 空间分辨率为9-km (约 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 经纬度网格点)。

本论文中选择的海区经纬度范围为: $30^\circ - 40^\circ \text{N}$, $117^\circ - 127^\circ \text{E}$, 主要包括我国渤海、黄海和东海海域。我们这里主要对黄海、东海海域进行分析, 选择这一海域的主要原因是因为我们在该海域进行过多次现场实验, 可以与卫星资料进行对比印证。

图 3.15(a) (b) (c) 分别给出了与我们上述三个航次对应的卫星气溶胶光学厚度分布图。

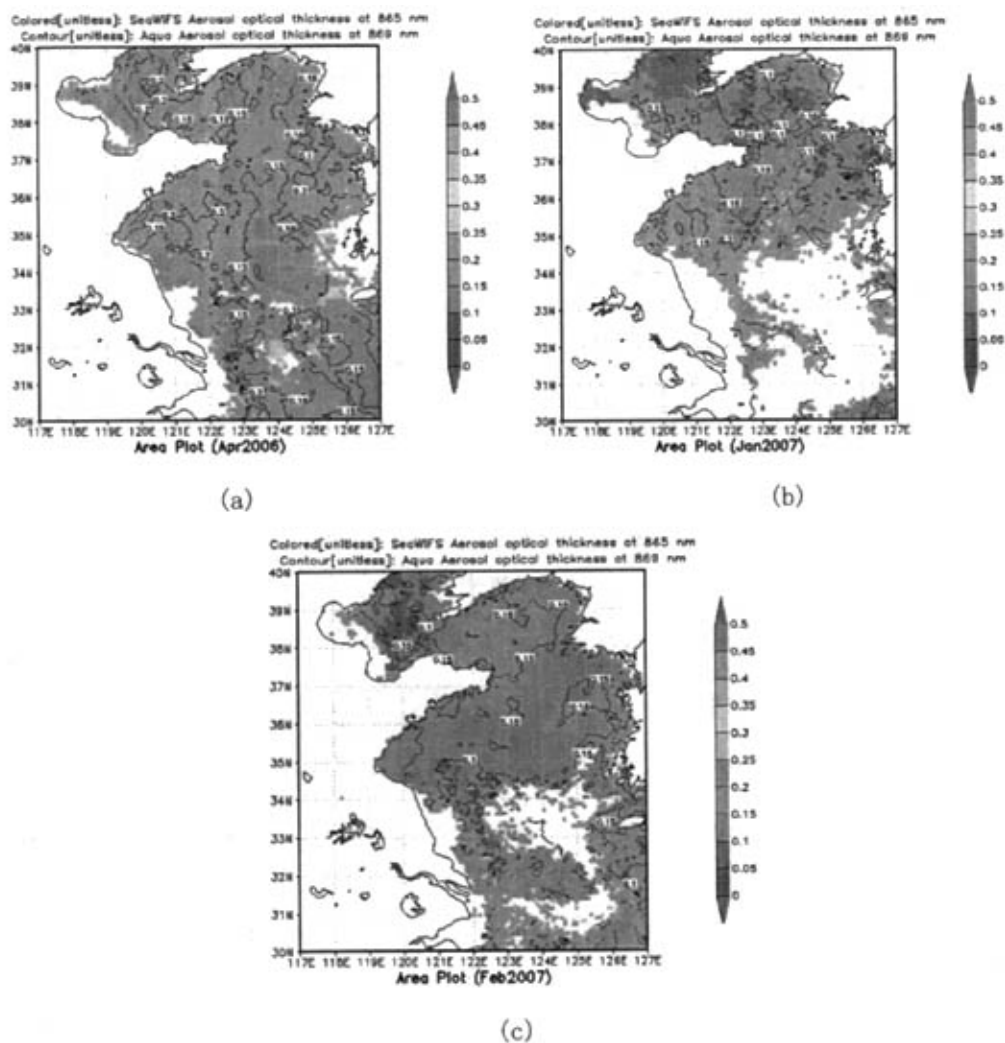


图 3.15 我国典型海区气溶胶光学厚度月平均分布图

(a)2006 年 4 月 (b)2007 年 1 月 (c)2007 年 2 月

3.3 现场测量与卫星遥感反演结果的比较

郝增周等^[37]利用 AERONET 中台湾中央大学、白滨町、安眠三个地点的现场观测资料，与 SeaWiFS 反演的气溶胶光学厚度进行了比较，认为：在中国海域，SeaWiFS 遥感气溶胶产品与地面实测站点的观测数据存在较好的一致性，因此，利用 NASA 提供的 SeaWiFS 气溶胶光学厚度数据可以研究中国海域气溶胶光学厚度的分布和变化特征。

我们在此基础上，也进行了定性的比较。图 3.16 给出了 PREDE 天空辐射计得到的

气溶胶光学厚度月平均值与 SeaWiFS 得到的卫星气溶胶光学厚度月平均值的比较。时间是 2006 年 4 月至 9 月, PREDE 天空辐射计观测地点位于逸夫馆五楼顶; 卫星观测点选择与 PREDE 天空辐射计观测地点接近的近海。二者具有相似的趋势, 说明了陆源气溶胶对近海海上气溶胶的影响。

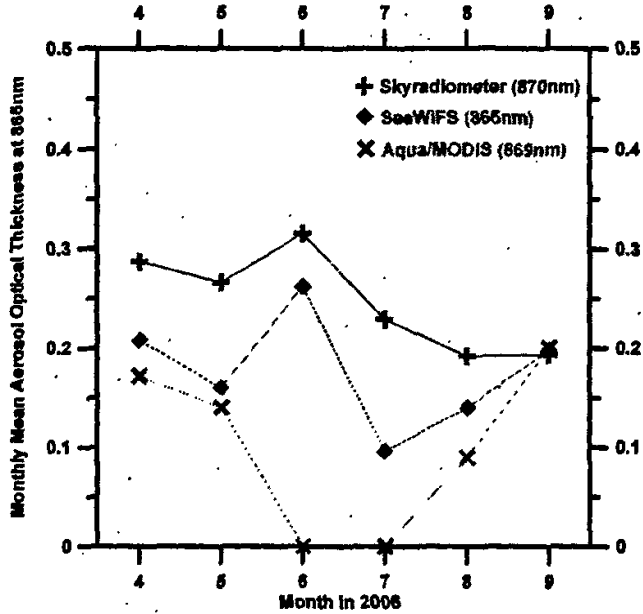


图 3.16 PREDE 天空辐射计与 SeaWiFS 得到的气溶胶光学厚度月平均值的比较

4 卫星遥感资料在研究中国海气溶胶时空分布中的应用

4.1 我国大陆地区气溶胶时空分布规律——基于实测资料的分析

近年来,国内外科学家和学者对中国地区气溶胶特性及其区域及全球气候效应的研究引起了广泛的关注。罗云峰等人^{[38][39][40]}利用全国46个甲种日射站1961-1990年仅30年逐日太阳直射辐射日总量和日照时数等资料,反演了30年来各站逐年、逐月 $0.75\mu\text{m}$ 大气气溶胶光学厚度(AOD)平均值,分析了我国陆地大气气溶胶光学厚度的年、季空间分布特征和年际之间的变化。图4.1(a)(b)(c)(d)分别给出了我国大陆地区大气气溶胶光学厚度的多年(1961-1990年)1月、4月、7月、10月的平均分布。

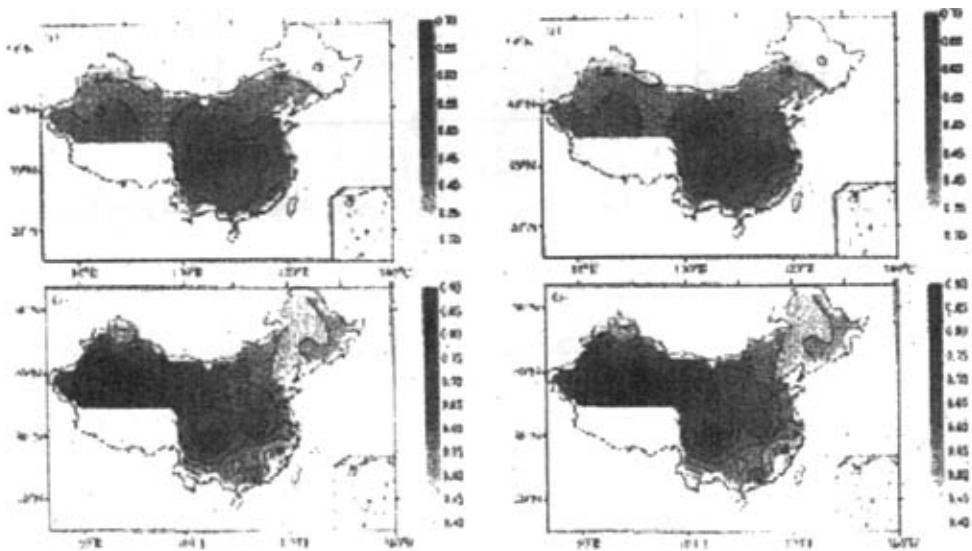


图4.1 我国大陆地区大气气溶胶光学厚度的多年(1961-1990年)平均分布

(a)1月 (b)4月 (c)7月 (d)10月 [摘自罗云峰等^[40]]

结果表明:我国大气气溶胶光学厚度的多年平均分布具有典型的地理特征,除个别大城市外, 100°E 以东, AOD以四川盆地为大值中心向四周减小; 100°E 以西, 南疆盆地为另一个大值中心。AOD的各季分布具有各自的特征。20世纪60年代,我国AOD的平均分布特征是以四川盆地和南疆盆地为两个大值中心向四周减小;70年代, 厥大多数地区AOD值增加, 其中从四川盆地到长江中下游地区以及华南沿海等地, AOD值增加较为明显。AOD的分布和60年代较相似;到80年代,我国大范围地区AOD继续呈增加趋势, 其中长江

中下游地区, AOD增加相当明显, AOD的分布发生了一定的变化。Uematsu等人^[41]在SADS-SEAREX Asian Dust Study计划中分析了太平洋7个岛上的气溶胶观测资料, 得出了太平洋北部春季大气中陆源气溶胶主要来自我国东北部干旱沙漠地区沙尘暴活动的结论。刘毅等^[42]利用中国近海10个航次的气溶胶现场观测资料, 统计分析了中国海区气溶胶中不同含量的时间变化和地理分布特征, 发现中国近海气溶胶中各种元素的含量受亚洲大陆和东亚季风气候的影响而呈现出显著的地理分布和时间变化特征, 赵崑等^[43]利用现场观测资料分析了我国黄海、东海上空春季气溶胶光学特性, 周良明等^[44]利用现场观测资料对渤海海域8月中下旬的大气衰减进行了分析。但是, 由于现场观测资料在时间和空间分布上的局限性, 对气溶胶的气候效应研究带来了很大的困难。

4.2 我国海域气溶胶时空分布规律——基于卫星遥感资料的分析

卫星遥感技术的发展为大气气溶胶研究提供了极好的手段。卫星遥感具有大面积覆盖、长时间序列的特点, 无论对人迹罕至的边远地区, 还是广阔的海洋, 都可以利用卫星进行观测, 大大促进了卫星遥感资料在气溶胶研究方面的应用。

利用卫星资料进行大气气溶胶的反演始于20世纪70年代后期, 1977年 NOAA/NESDIS开始利用 AVHRR可见光第一通道 ($0.63\ \mu\text{m}$) 进行海洋上空气溶胶光学厚度的遥感反演, 目前NESDIS利用NOAA/AVHRR资料反演已进入第2代算法^{[45][46][47]}, 并投入业务化运行, 每周提供一次全球洋面上空气溶胶光学厚度分布图, 用来分析全球海上气溶胶的分布特性。他们从两个可见、近红外通道 ($0.63, 0.83\ \mu\text{m}$) 反演出这两个波长的气溶胶光学厚度, 并由此推出反映气溶胶粒子大小信息的Angstrom指数。随后, TOMS、OCTS、POLDER、SeaWiFS、MODIS、MERIS^{[47][48][49][50][51]}等卫星传感器相继发射, 它们都能够进行大气气溶胶的反演。

Chou等^[52]利用SeaWiFS资料研究了全球海洋上空气溶胶光学厚度的分布及其辐射强迫效应, 发现全球海洋上空气溶胶光学厚度存在纬向分布特征, 其分布与大气环流有关, 而中国海域是全球海洋上气溶胶辐射最强烈的区域之一。我国科学家对我国近海的气溶胶作了一些观测研究工作。刘毅等^[53]开展了中国东部海域大气气溶胶入海通量的研究; 郝增周等^[54]利用1997年9月至2002年4月的SeaWiFS月平均气溶胶光学厚度产品, 分析了我国海域气溶胶光学厚度的季节变化和地理分布特征。研究结果表明: 中国东部海域平均气溶胶光学厚度存在以中纬度为中心的纬向分布; 受沙尘、季风气候的影响, 中国海域气溶胶光学厚度存在季节变化, 不同海区有不同的季节变化和分布特征。渤海、黄海

及东海有类似的变化特征,春季都受到沙尘气溶胶的影响,使中国东部海域气溶胶光学厚度普遍高于0.160,且对东海的影响最大;夏、秋季逐渐减小,冬季有所回升。南海气溶胶光学厚度均值为0.150,随时间变化不明显,但地理分布变化显著;受季风气候的影响,从春季到冬季,气溶胶光学厚度高值中心从高纬海域向低纬海域转移,范围也逐渐扩大。冬季南海大部分海域气溶胶光学厚度都达到0.160以上,是整个中国海域冬季气溶胶光学厚度最大的海区。

本论文中,我们利用2000年至2006年7年的SeaWiFS卫星传感器和Aqua/MODIS卫星传感器融合的大气气溶胶月平均反演资料,分析我国黄海海区海洋上空大气气溶胶的时空分布特征。

4.2.1 卫星资料来源

本论文采用卫星资料是基于美国国家宇航局(NASA)提供的公开资料,是在海色时间序列计划(The Ocean Color Time-Series Project)的框架下提供的。我们采用的是海洋生态处理小组(The Ocean Biology Processing Group:OBPG)提供的SeaWiFS卫星传感器和Aqua/MODIS卫星传感器融合的全球9-km月平均产品(OBPG SeaWiFS/Modis_Aqua Monthly Global 9-km Products),地球物理参数是大气气溶胶光学厚度(其中SeaWiFS对应865nm,Aqua/MODIS对应869nm),时间尺度是2000年至2006年共7年,空间分辨率为9-km(约 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 经纬度网格点)。

本论文中选择的海区经纬度范围为: 30° - 40° N, 115° - 125° E,主要包括我国渤海、黄海和东海海域。我们这里主要对黄海海域进行分析,选择这一海域的主要原因是因为我们在此海域进行过多次现场实验,可以与卫星资料进行对比印证。图4.2(a)(b)(c)(d)分别给出了2006年1月、4月、7月和10月该海域气溶胶光学厚度的分布图。图中假彩色编码图像代表SeaWiFS 865nm的气溶胶光学厚度,等值线代表Aqua/MODIS对869nm的气溶胶光学厚度。从图中可以看出,从整体上来看,2006年4月份我国海域的气溶胶光学厚度较其它月份要高一些,这主要是由每年春季爆发的沙尘暴的影响;渤海海域气溶胶光学厚度值1月份最低,4月份最高,7月份、10月份依次减小;黄海、东海海域的气溶胶光学性质比较接近,呈季节分布,春、夏季气溶胶光学厚度值较高,秋、冬季较低,且受陆源气溶胶的影响较大,由近岸到大洋,气溶胶光学厚度值呈减小的趋势。

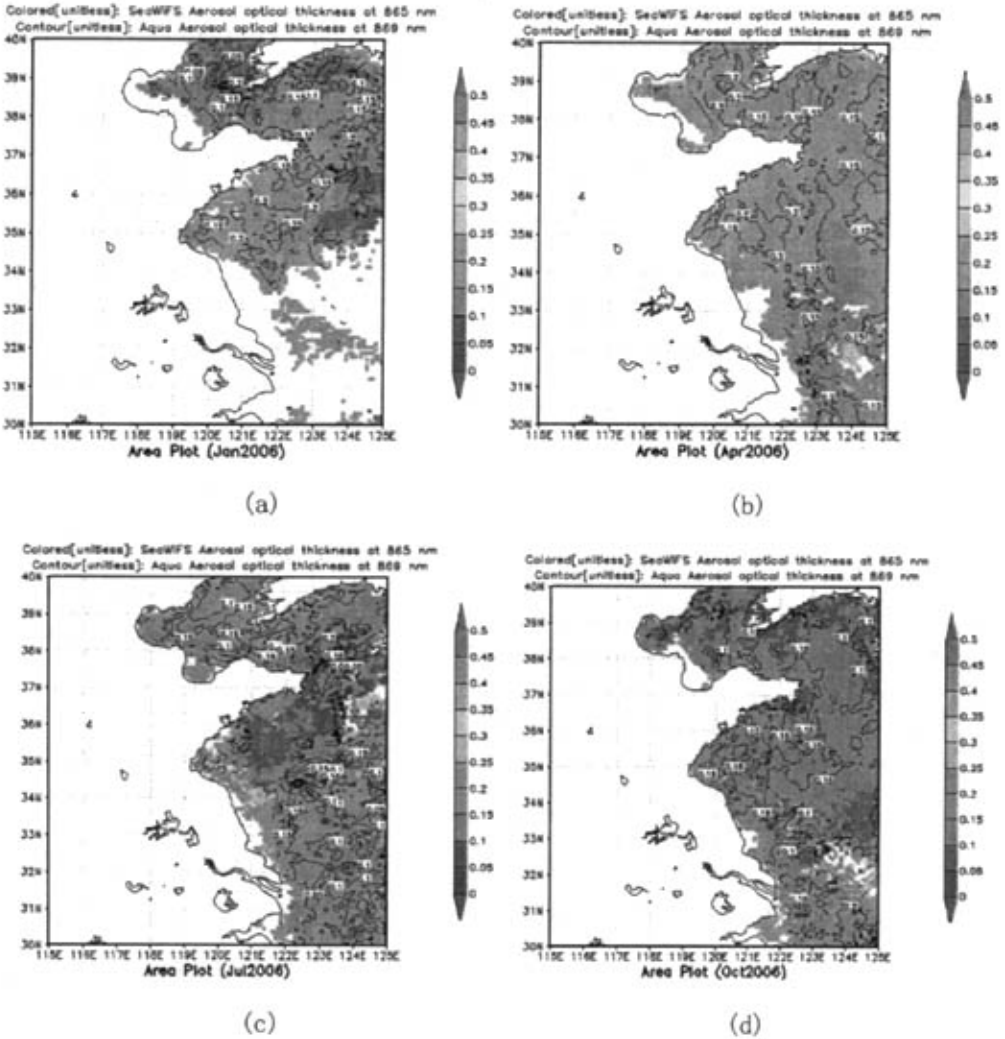
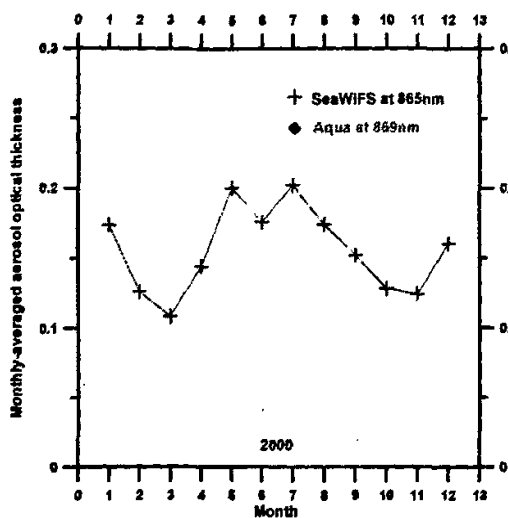


图4.2 2006年我国典型海域海上气溶胶光学厚度的月平均分布图

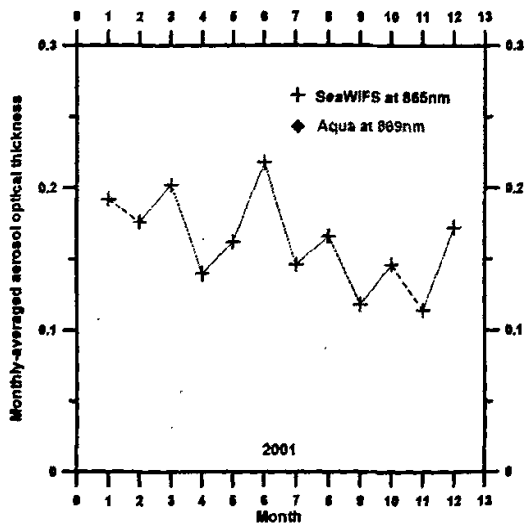
(a)1月 (b)4月 (c)7月 (d)10月

4.2.2 不同年份的季节性变化

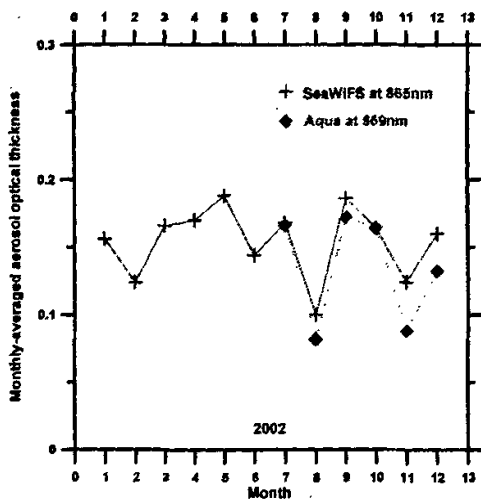
图4.3(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) 分别给出了靠近青岛的黄海海域典型站位(36°N, 122°E) 2000-2006年7年间气溶胶光学厚度每年的月平均变化。



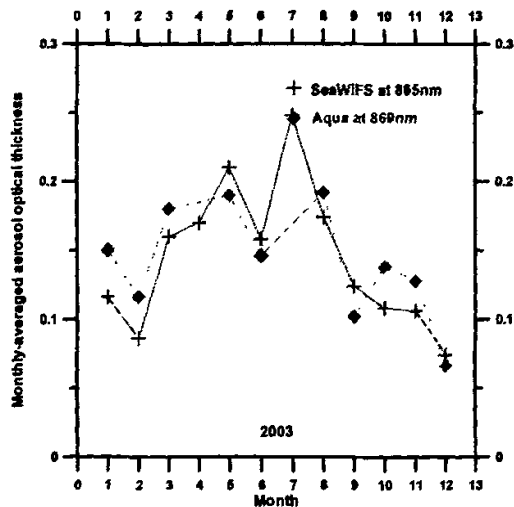
(a)



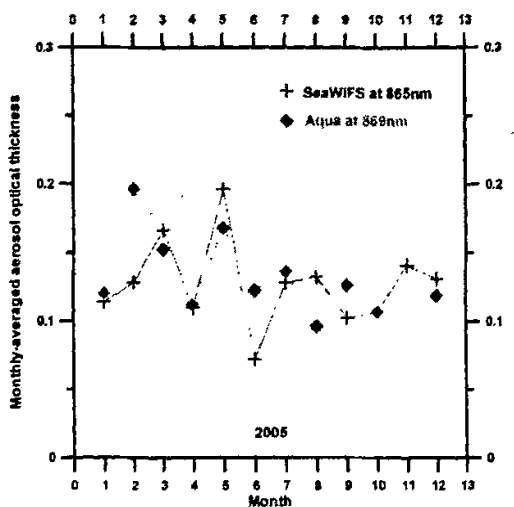
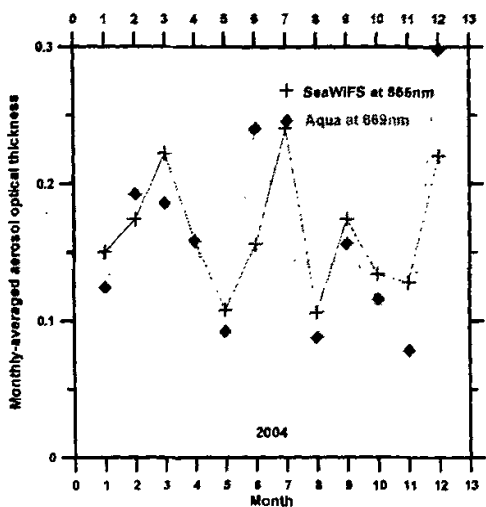
(b)



(c)



(d)



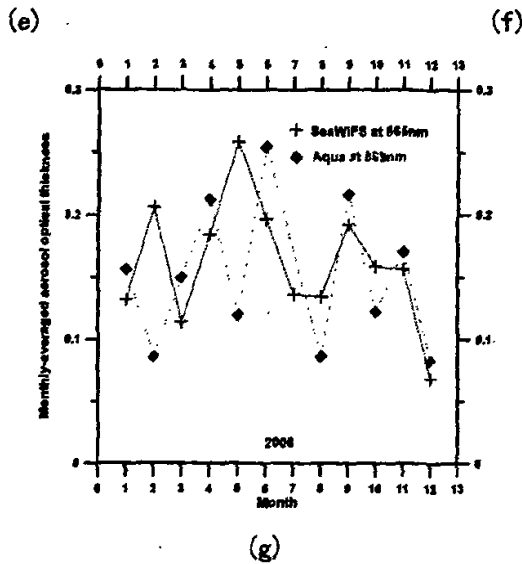


图4.3 靠近青岛的黄海海域典型站位 (36°N, 122 °E) 2000-2006年7年间气溶胶光学厚度每年的月平均变化

(a) 2000年 (b) 2001年 (c) 2002年 (d) 2003年 (e) 2004年 (f) 2005年 (g) 2006年

从图中可以看出，一年内气溶胶光学厚度的月平均值有明显的变化，且不同年份的变化趋势也有一定的差异。如果按季节来分，春季为3-5月，夏季为6-8月，秋季为9-11月，冬季为12-2月。一般来说，每年春季，受北方沙尘暴的影响，黄海、东海气溶胶光学厚度出现全年的最大值；但有的年份，由于春季沙尘暴天数的减少，如2003、2004年，气溶胶光学厚度最大值出现在夏季的7月份；秋季整个中国海域的气溶胶光学厚度值一般为全年平均的最小值；冬季，由于受季风影响以及城市燃煤供暖造成的大气污染，使得气溶胶光学厚度值比秋季有所回升。

图4.4给出了靠近青岛的黄海海域典型站位 (36°N, 122 °E) 2000-2006年7年间平均的气溶胶光学厚度的月平均变化。

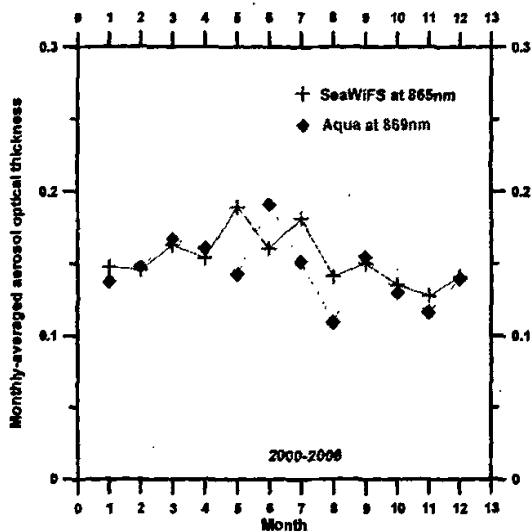
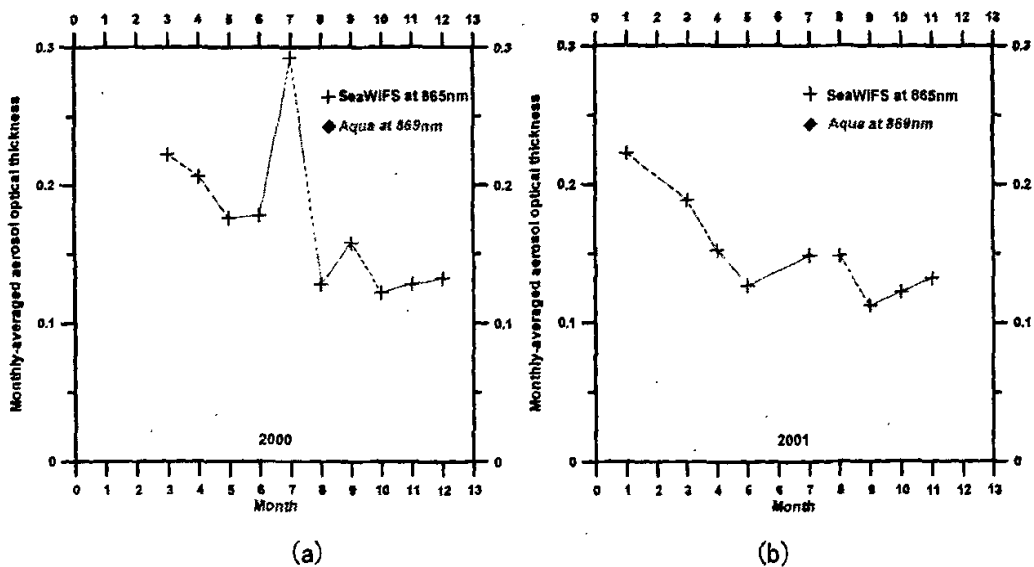
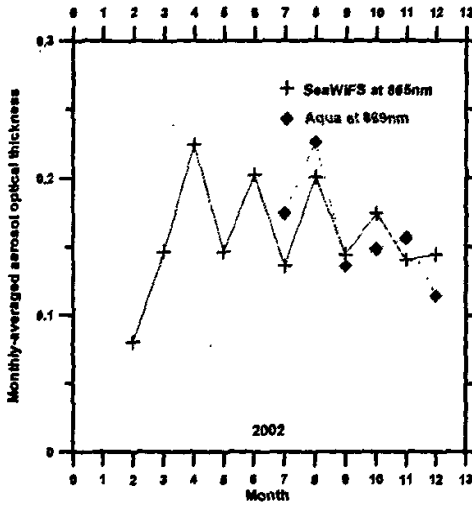


图4.4 靠近青岛的黄海海域典型站位 (36°N, 122 °E) 2000-2006年7年间平均的气溶胶光学厚度的月平均变化

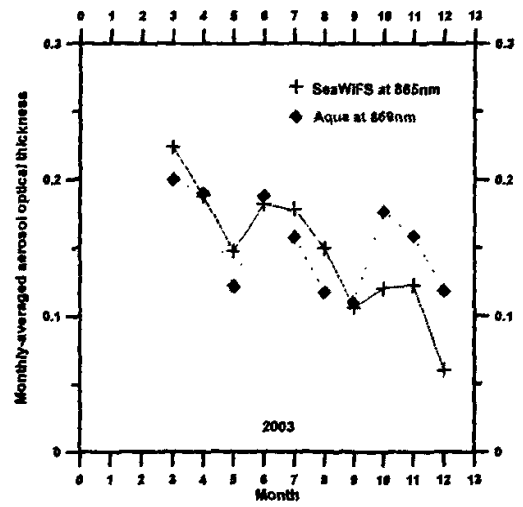
从7年的月平均值来看, 气溶胶光学厚度在春、夏季较大, 其中春季5月份达到最大值, 夏季7月份也较大, 秋、冬季较小, 其中秋季11月份达到最小值。

图4.5(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) 分别给出了黄海海域中部典型站位 (35°N, 125 °E) 2000-2006年7年间气溶胶光学厚度每年的月平均变化。该站位离陆地比较远, 受陆源气溶胶的影响较小。

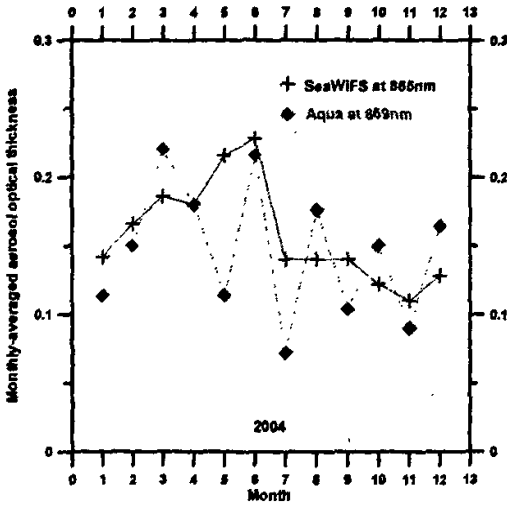




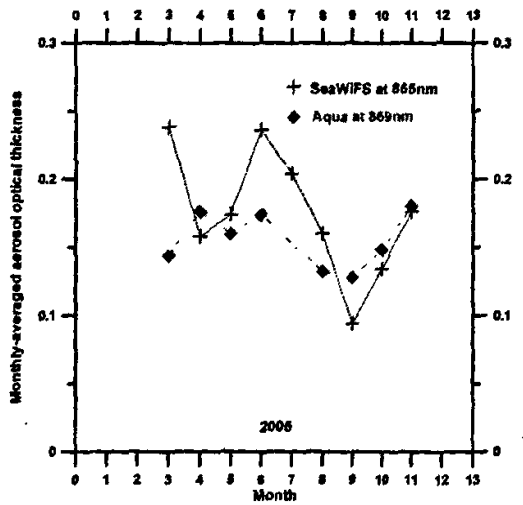
(c)



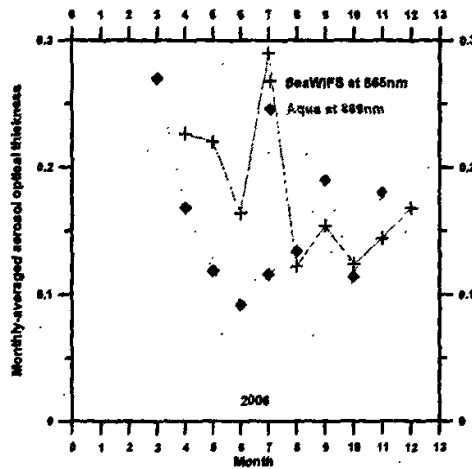
(d)



(e)



(f)



(g)

图4.5 黄海海域中部典型站位 (35°N, 125 °E) 2000-2006年7年间气溶胶光学厚度每个月的月平均变化

(a)2000年 (b)2001年 (c)2002年 (d)2003年 (e)2004年 (f)2005年 (g)2006年

图4.6给出了黄海海域中部典型站位 (35°N, 125 °E) 2000-2006年7年间平均的气溶胶光学厚度的月平均变化。

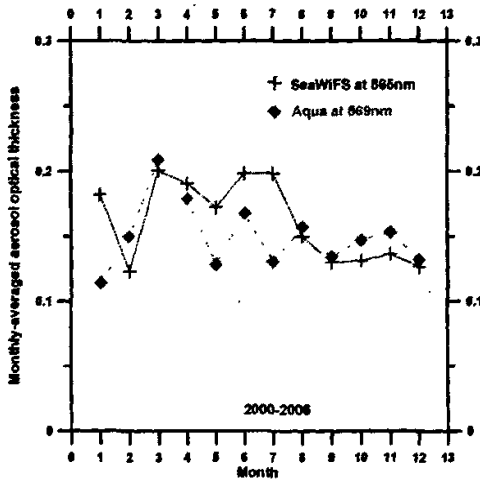


图4.6 黄海海域中部典型站位 (35°N, 125 °E) 2000-2006年7年间平均的气溶胶光学厚度的月平均变化

图4.7给出了靠近青岛的黄海海域典型站位 (36°N, 122 °E) 2000-2006年7年间年平均的气溶胶光学厚度的变化。

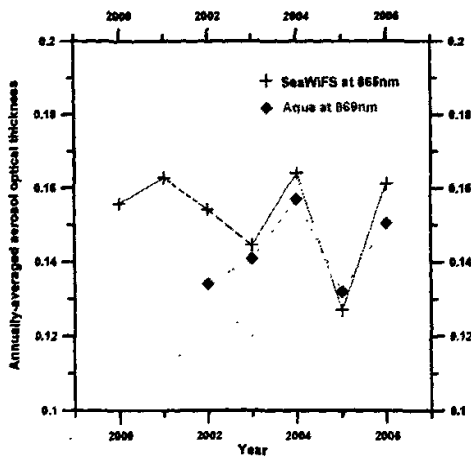


图4.7 靠近青岛的黄海海域典型站位 (36°N, 122 °E) 2000-2006年7年间年平均的气溶胶光学厚度的变化

图4.8给出了黄海海域中部典型站位(35°N, 125°E)2000-2006年7年间年平均的气溶胶光学厚度的变化。

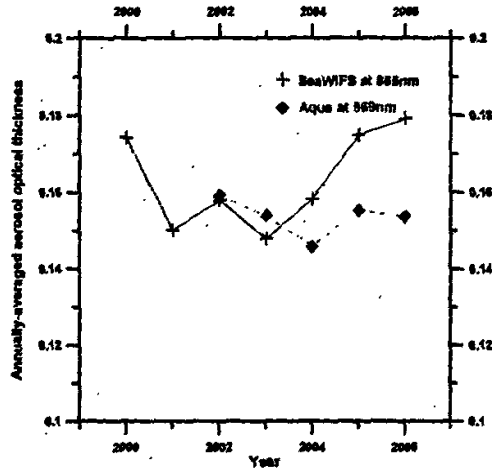


图4.8 黄海海域中部典型站位(35°N, 125°E)2000-2006年7年间年平均的气溶胶光学厚度的变化

从图4.7青岛附近7年的年平均值来看,气溶胶光学厚度在2001、2004、2006年较大,而在2003、尤其是2005年较小。这与每年发生的沙尘暴次数、强度及影响范围有密切联系。

国家气象局周自江研究员对我国近50年的沙尘暴纪录进行研究后发现,以10年为界观察,我国沙尘暴的总趋势是弱化的。曾经引起全国注意的2000年与2001年的北京沙尘暴,其强度也没有超过50年来的平均水平,属于阶段反弹。沙尘暴形成的内外因分别是地表丰富的松散干燥沙尘和足够强劲持久的风力。其中风力条件对沙尘暴增减趋势的影响更为显著。近20年来沙尘暴强度整体弱化的原因主要就是大气环流变化引起的东亚冬季风减弱造成的。

中国环境监测总站的监测结果表明,我国2004年以来发生沙尘天气6次,与近年同期(2004年3月10日以前)相比,较2003年增加4次,较2002年增加3次,与沙尘天气频发的2001年相比,减少3次。其中,影响范围达到和超过5省(自治区、直辖市)的沙尘天气2次,受到沙尘天气影响的省(自治区、直辖市)为11个。2003年,我国发生沙尘天气11次,影响范围达到和超过5省(自治区、直辖市)的沙尘天气3次,受到

沙尘天气影响的省(自治区、直辖市)为 9 个。2002 年,我国发生沙尘天气 16 次,影响范围达到和超过 5 省(自治区、直辖市)的沙尘天气 5 次,受到沙尘天气影响的省(自治区、直辖市)为 19 个。2001 年,我国发生沙尘天气 26 次,影响范围达到和超过 5 省(自治区、直辖市)的沙尘天气 10 次,受到沙尘天气影响的省(自治区、直辖市)为 17 个。

图 4.9 给出了 2000 年至 2006 年我国沙尘发生次数的统计图。从中可以看出,2001、2004、2006 年沙尘发生次数较多,而 2003 年、2005 年沙尘发生次数较少,这与靠近陆地的图 4.7 给出的结果相吻合。这也说明了陆源气溶胶对近岸海域的影响。而远离陆地的海域,如图 4.8,其气溶胶的年际变化规律与沙尘的相关性要弱一些。

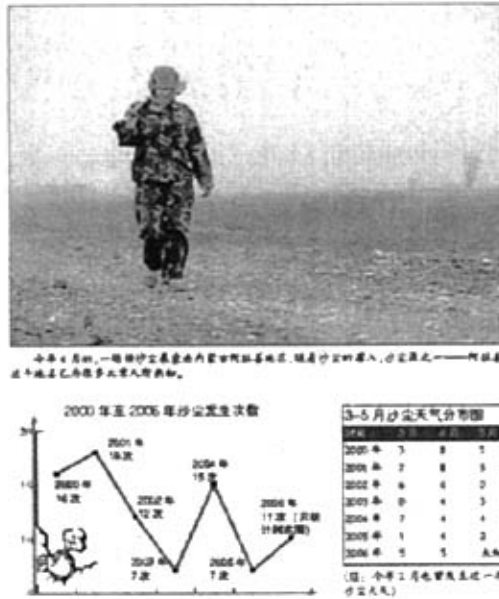


图4.9 2000年至2006年我国沙尘发生次数的统计图

5 总结与展望

本论文采用的现场观测资料包括 ACE-Asia 2001 大型现场调查实验资料、中国 SOLAS 2006 春季黄海航次出海实验、2006 冬季 908 北黄海航次、2006 年冬季 973 东海航次获得的资料以及与国内外合作单位之间交流、共享的资料。卫星遥感资料以 2000-2006 年 7 年尺度的 SeaWiFS 资料为主, 采用 NASA 推荐的 SeaWiFS 数据处理软件 SeaDAS 进行处理。其它卫星传感器, 如 Aqua/MODIS 作为辅助。首先利用现场实测资料对卫星资料进行印证。我们使用的 PREDE 天空辐射计是海、陆两用型, 既可以进行陆地定点自动观测, 也可以安装在船上进行海上现场观测。我们将 PREDE 天空辐射计得到的气溶胶光学厚度月平均值与 SeaWiFS 得到的卫星气溶胶光学厚度月平均值的比较。时间是 2006 年 4 月至 9 月, PREDE 天空辐射计观测地点位于逸夫馆五楼顶; 卫星观测点选择与 PREDE 天空辐射计观测地点接近的近海, 二者具有相似的趋势。

在印证的基础上, 利用长时间序列的卫星遥感资料, 研究我国海区气溶胶的时空分布特性及变化规律。本论文中选择的海区经纬度范围为: 30° - 40° N, 117° - 127° E, 主要包括我国渤海、黄海和东海海域。我们这里主要对黄海、东海海域进行分析, 选择这一海域的主要原因是因为我们在此海域进行过多次现场实验, 可以与卫星资料进行对比印证。

如果按季节来分, 春季为 3-5 月, 夏季为 6-8 月, 秋季为 9-11 月, 冬季为 12-2 月。一般来说, 每年春季, 受北方沙尘暴的影响, 黄海、东海气溶胶光学厚度出现全年的最大值; 但有的年份, 由于春季沙尘暴天数的减少, 如 2003、2004 年, 气溶胶光学厚度最大值出现在夏季的 7 月份; 秋季整个中国海域的气溶胶光学厚度值一般为全年平均的最小值; 冬季, 由于受季风影响以及城市燃煤供暖造成的大气污染, 使得气溶胶光学厚度值比秋季有所回升。

从 2000 年至 2006 年我国沙尘发生次数的统计中可以看出, 2001、2004、2006 年沙尘发生次数较多, 而 2003 年、2005 年沙尘发生次数较少, 这与我们根据卫星遥感资料发觉得靠近青岛的黄海海域典型站位 (36° N, 122° E) 2000-2006 年 7 年间年平均的气溶胶光学厚度的变化的结果相吻合。

因此,利用现场观测及已有的长时间序列的卫星遥感资料,分析中国海各海区气溶胶的时空分布特性,研究我国每年的沙尘暴、工业大气污染等过程对气溶胶时空分布的影响具有极其重要的意义。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

参考文献

- [1] Shaw, G. E., Transport of Asian desert aerosol to the Hawaiian Islands, *J. Appl. Meteorol.*, 19, 1254-1259, 1980.
- [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] 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, 16889-16909, 1997.
- [4] Menon, S., J. Hansen, L. Nazarenko, and Y. Luo, Climate Effects of Black Carbon Aerosols in China and India, *Science*, 297, 2250-2253, 2002.
- [5] 毛节泰, 张军华, 王美华, 中国大气气溶胶研究综述, *气象学报*, 2002, 60 (5), 625-635
- [6] 张军华, 斯召俊, 毛节泰等, 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.
- [7] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 刘晓阳, 刘桂青, 朱爱华, 利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染, *大气科学*, Vol.27, No.5, 869-880, 2003
- [8] 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.
- [9] Durkee, P. A., F. Pfeil, E. Frost and R. Shema, 1991: Global analysis of aerosol particle characteristics, *Atmos. Environ.*, 25A, 2457-2471.
- [10] Higurashi, A., and T. Nakajima, 1999: Development of a two channel aerosol retrieval algorithm on global scale using NOAA AVHRR. *J. Atmos. Sci.*, 56, 924-941.
- [11] Gordon, H. R., and M. Wang, 1994: Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm. *Appl. Opt.*, 33, 443-452.
- [12] 刘强, 王明星, 李晶, 张仁健, 大气气溶胶研究现状和发展趋势, *中国粉体技术*, 1999, 18 (1), 17-23
- [13] 章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程[M]. 北京: 气象出版社. 1995.
- [14] 朱厚玲. 2003. 我国地区黑碳气溶胶时空分布研究[D]. 硕士学位论文, 北京, 中国气象科学研究院.
- [15] 刘毅, 王明星, 张仁健. 中国气溶胶研究进展[J]. *气候与环境研究*, 1999, 4 (4):406-414.
- [16] 尹宏. 大气辐射学基础[M]. 北京: 气象出版社. 1993.

- [17] Shettle, E. P., and R. W. Fenn, Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effect of humidity variations on their optical properties, *Rep. AFGL-TR-79-0214*, (U. S. Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base, Mass), 1979.
- [18] 邱明燕. 2004. 青岛地区气溶胶特性的初步研究[D], 硕士论文, 青岛, 中国海洋大学.
- [19] 王耀庭, 王桥, 王艳姣等. 大气气溶胶性质及其卫星遥感反演[J]. 18 (6), 2005:27-33.
- [20] Stewart R.H. *Methods of Satellite Oceanography*[R]. University of California Press, 1985, 360pp.
- [21] 金亚秋. 电磁散射和热辐射的遥感理论[M]. 北京: 科学出版社. 1993. 292页.
- [22] IPCC, Climate Change 1995. The Science of Climate Change, Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [23] 王明星. 气溶胶与气候[J]. 气候与环境研究, 2000, 5 (1): 1-5.
- [24] Durkee, P. A., F. Pfeil, E. Frost and R. Shema, 1991: Global analysis of aerosol particle characteristics, *Atmos. Environ.*, **25A**, 2457-2471.
- [25] Higurashi, A., and T. Nakajima, 1999: Development of a two channel aerosol retrieval algorithm on global scale using NOAA AVHRR. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 924-941.
- [26] Tanre', J.-L. Deuze', P. Goloub, T. Nakajima, A. Higurashi, O. Torres, and B. Holben, 2004: Intercomparison of Satellite Retrieved Aerosol Optical Depth over the Ocean, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **61**, 499-513
- [27] Kaufman, Y. J., and C. Sendra, 1988: Satellite mapping of aerosol loading over vegetated areas. *Aerosols and Climate*, V. Hobbs and M. McCormick, Eds., A. Deepak Publ., **114**, 51-67.
- [28] Holben, B. N., and Coauthors, 1998: AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ.*, **66**, 1-16.
- [29] Kaufman, Y. J., and J. H. Joseph, 1982: Determination of surface albedos and aerosol extinction characteristics from satellite imagery. *J. Geophys. Res.*, **20**, 1287-1299.
- [30] Kaufman, Y. J., 1987: Satellite sensing of aerosol absorption. *J. Geophys. Res.*, **92**, 4307-4317.
- [31] Gordon, H. R., and M. Wang, 1994: Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm. *Appl. Opt.*, **33**, 443-452.
- [32] Nakajima, T., Tonna, G., Rao, R., Boi, P., Kaufman, Y., and B. Holben, 1996: Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions, *App. Opt.*, Vol 35, 2672-2686.

- [33] Toshiyuki Murayama, Nobuo Sugimoto, Itsushi Uno, et al, 2001, Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 106(D16): 18,345 - 18,359.
- [34] Nakajima, T., M. Tanaka, M. Yamano, M. Shiobara, K. Arao, Y. Nakanishi, Aerosol optical characteristics in the yellow sand events observed in May, 1982 at Nagasaki, part II, Models, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 67, 269 - 291, 1989.
- [35] Niimura, N., K. Okada, X. B. Fan, K. Kai, K. Arao, G. Y. Shi, and S. Takahashi, Formation of Asian dust-storm particles mixed internally with sea salt in the atmosphere, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 76, 275 - 288, 1998.
- [36] Yoon, S. C., and J. G. Won, Monitoring of atmospheric aerosols in Seoul using a micropulse lidar, in *19th International Laser Radar Conference*, NASA/CP-1998-207671/PT1, pp. 83 - 85, 1998.
- [37] 郝增周, 潘德炉, 白雁, SeaWiFS遥感资料分析中国海域气溶胶光学厚度的季节变化和分布特征[J], *海洋学研究*, 2007, 25 (1): 80-87.
- [38] 罗云峰, 李维亮, 周秀骥, 20世纪80年代中国地区大气气溶胶光学厚度的平均状况分析[J], *气象学报*, 2001, 59 (1): 77-87.
- [39] Luo Y. F., Lu D. R., Zhou X. J., et al., Characteristics of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in last 30 years, *Journal of Geophysical Research*[J], 2001, 106(D13): 14 501-14 513.
- [40] 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 李维亮, 30年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析[J], *大气科学*, 2002, 26 (6): 721-730.
- [41] Uematsu, M., Duce R. A., Prospero J. M., et al., Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean[J], *Journal of Geophysical Research*[J], 1983, 88: 5 343-5 352.
- [42] 刘毅, 周明煜, 中国近海大气气溶胶的时间和地理分布特征[J], *海洋学报*, 1999, 21 (1): 32-40.
- [43] 赵崴, 唐军武, 高飞, 林明森, 东海、黄海上空春季气溶胶光学特性观测分析[J], *海洋学报*, 27 (2): 46-53.
- [44] 周良明, 郭佩芳, 刘玉光, 渤海海域上空大气衰减光学厚度的研究[J], *高技术通讯*, 2005, 15 (6): 102-105.
- [45] STOWE L L, IGNATOV A M, SINGH R R, Development, validation, and potential enhancements to the second generation operational aerosol product at the National Environmental Satellite, Data, and Information Service of the National Oceanic and Atmospheric Administration[J], *J. Geophys. Res.*, 1997, 102: 16 923 -16 934.

- [46] HUSAR R B, PROSPERO J M, STOWE L L, Characterization of tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA advanced very high resolution radiometer optical thickness operational product [J], J Geophys Res, 1997, 102 : 16 889-16 9091.
- [47] HIGURASHI A, NAKAJIMA T, Development of a two channel aerosol retrieval algorithm on global scale using NOAA AVHRR[J], J Atmos Sci, 1999, 56: 924-941.
- [48] GORDON H R, WANG M, Retrieval of water leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm[J], Appl Opt, 1994, 33: 443-452.
- [49] KAUFMAN Y J, TANRE D, GORDON H R, et al. Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect[J], J Geophys Res, 1997, 202:16 815-16 8301.
- [50] KING M D, KAUFMAN Y J, TANRE D, et al. Remote sensing of tropospheric aerosols from space: past, present, and future[J], Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(11): 2 229-2 2591.
- [51] Brajard J, Niang A, Sawadogo S, et al, Estimating aerosol parameters above the ocean from MERIS observations using topological maps[J], International Journal of Remote Sensing, 28(3 & 4), 2007, 781-795.
- [52] CHOU M D, CHAN P K, WANG M H, Aerosol radiative forcing derived from SeaWiFS-Retrieved aerosol optical properties[J], Journal of the Atmospheric Sciences, 2002, 59: 748-757.
- [53] 刘毅,周明煜,中国东部海域大气气溶胶入海通量的研究[J],海洋学报,1999,21(5):38-451.
- [54] 郝增周,潘德炉,白雁,SeaWiFS遥感资料分析中国海域气溶胶光学厚度的季节变化和分布特征[J],海洋学研究,2007,25(1):80-87.

致 谢

这篇论文是在导师陈文忠悉心指导下完成的。在三年的硕士研究生期间，陈老师在学习上和生活上给了我大量的支持、帮助和鼓励，在此致以深深的谢意。陈老师严谨的治学态度、求实的工作作风、丰富的科研经验、科学的思考方式和平易近人的处世风范都对我产生了深远的影响。

感谢海洋遥感所的各位老师在这三年来对我的培养、教育和学业上的引导。三年中，众多的师长、朋友们给予了我无私的帮助，鞭策我在学业上不断地进步。感谢我在研究生期间的各位朋友，他们的理解、支持和帮助，给了我前进的动力，使我在学习过程中能够知难而进，最终取得学业上的进步和成功。

另外，我还要特别感谢养育我的父母和一直关心、支持我的亲人们，他们的鞭策、鼓励、理解和支持是我克服困难、不断前进的精神动力，在这里献上我衷心的祝福和深深的谢意。