

南京信息工程大学

硕士学位论文

基于光度计沙尘监测系统研制及云对AOD反演影响分析

姓名：许丹

申请学位级别：硕士

专业：大气物理学与大气环境

指导教师：牛生杰

20080501

摘要

中国气溶胶观测网络CAeroNet在我国北方建立了20个沙尘暴监测站, 设有太阳光度计(CE318-2)、能见度仪等先进仪器和设备。本文根据实际应用需求, 研制“基于CE318太阳光度计的沙尘监测预警系统”, 首次在国内CE318光度计的观测业务中, 实现了观测数据的实时自动反演、结果显示和保存, 无须人工干预。在气溶胶观测研究、特别是在我国北方沙尘天气的监测预警中, 凸显了该仪器自动跟踪观测的优势。配套开发的历史资料处理软件采用云处理方案获得更高质量的反演结果。

利用锡林浩特地区CE318太阳光度计资料研究表明: 该太阳光度计滤光片年衰减率达20%以上。本文根据当地实际气候条件, 提出利用多日背景大气Langley定标后, 获得定标系数年变化曲线, 进而插值计算各月定标系数来提高气溶胶光学厚度(AOD), 特别是晴天天气条件下AOD的反演精度。本文对该地区全年晴天资料做了统计分析。利用沙尘天气光度计资料, 结合卫星资料分析指出, 云的发生发展可以引起光度计反演结果日变化曲线出现多峰值。云随沙尘气溶胶的传输路径移动发展是干扰太阳光度计反演结果的主要原因。同时云、气溶胶相互作用又增加了分析云辐射强迫的难度。

无云干扰的沙尘天气, 太阳光度计反演得到的大气柱AOD和大气浑浊度, 与水平能见度呈乘幂关系, 波长指数与能见度呈对数关系, 相关性达80%以上。综合考虑大气水平能见度和大气柱气溶胶光学厚度, 可以提高监测预警的精度, 避免单一采用光度计资料时因云干扰而造成错误预警。当光度计反演得到的AOD突然剧增超过1, 同时能见度仪数值突然骤减(拟合得到的AOD相应剧增超过1), 则往往伴随着沙尘天气的发生发展。

采用消光法反演气溶胶粒度谱发现, 锡林浩特地区沙尘天气发生阶段, 粒径范围 $0.3\sim 3\mu\text{m}$ 的气溶胶浓度剧增且超过一个量级, 该指标可以作为该地区对沙尘天气进行监测预警的方法之一。另一方面, 粒径处于该范围的气溶胶对人体呼吸系统的影响相对最大, 采用消光法反演该粒径范围气溶胶粒度谱, 对监测大气污染程度和关注人类健康, 都具有实际意义。

关键词: 太阳光度计, 能见度, 粒度谱, Langley定标, 沙尘气溶胶

Abstract

A dust-sand storms monitoring and precaution system (RealTime) based on CE318 has been developed. It is a kind of application software based on the object oriented programming method. This kind of application software can analyze the large amount of data generated during the process of real-time observation and perform automatically to compute, display and store the data of aerosol optical properties of different filters. It can make good use of the real-time measurements in the research of aerosols, especially in the research of monitoring and precaution of dust-sand storms in the northern part of China. The results have been proved to be in chime with the data of AERONET. A kind of application software (Timeshow) with the cloud-screening algorithm has also been developed to deal with the historic data.

The observation of the CE318 over Xilinhote of the year 2006 was analyzed. We analyzed the variation of calibration value within the variation of cloud, as well as the impact on the precision of retrieval results influenced by the frequency of calibration. With the calibration values of fine quality and the retrieval method coincident with AERONET, we got daily variations of AOD in different weather conditions and the observation precision influenced by cloud. In addition, we used the satellite data for a previous study.

With the observation of visibility meter, we got the correlation coefficient between AOD and visibility in dusty weather. The results presented a power relation between AOD and visibility, and presented a logarithm relation between Angstrom exponent and visibility.

The results of spectrum distribution showed that extinction method retrieve better between the spectrums ranging from 0.1 to $5\mu\text{m}$, especial between the spectrums ranging from 0.1 to $1\mu\text{m}$. The spectrum distribution in the dust weather was quite different from that in the fair weather. In the dusty weather, a remarkable increase of aerosol number concentration of the large dust particles ($r > 0.3\mu\text{m}$) by one magnitude was realized. The aerosol size distribution was similar to a Junge distribution.

Key words: Sun photometer, Visibility, Spectrum distribution, Langley plot method, Dust aerosols

学位论文独创性声明

本人郑重声明：

- 1、坚持以“求实、创新”的科学精神从事研究工作。
- 2、本论文是我个人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。
- 3、本论文中除引文外，所有实验、数据和有关材料均是真实的。
- 4、本论文中除引文和致谢的内容外，不包含其他人或其它机构已经发表或撰写过的研究成果。
- 5、其他同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了声明并表示了谢意。

作者签名： 许丹

日 期： 2008.6.1

学位论文使用授权声明

本人完全了解南京信息工程大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版；有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅；有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索；有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

作者签名： 许丹

日 期： 2008.6.1

第一章 绪论

1.1 研究的目的和意义

随着对地球系统内各种物理过程认识的深化,以及探测和计算机技术的发展,大气气溶胶对气候变化影响的不确定性成为当前大气科学研究倍受关注的热点问题^[1-3]。一方面,大气中的气溶胶粒子通过吸收和散射辐射直接影响地-气辐射收支;另一方面,气溶胶以云凝结核(CCN)的形式改变云的微物理特性而间接影响气候^[4-8]。此外,它还参与臭氧的非均相反应,影响臭氧平衡,间接影响地气系统的能量收支^[9]。

解决和回答地球系统的科学问题,观测系统的建设至关重要,目前国际上几个大型研究计划都把观测系统的建设放在首位^[10,4]。由于气溶胶研究强烈依赖于观测数据的获取,因此气溶胶观测网络建设也是解决气溶胶科学问题的首要工作。大气气溶胶光学特性的地基观测,特别是联网观测,由于其理论发展和较易维护,成为当前研究气溶胶科学问题的重要观测平台与基础^[2,11,12]。另一方面,卫星反演气溶胶光学特征过程中,源于地表反照率和气溶胶模型带来的实际误差难以估计,因此需要同时有地面太阳光度计同步观测进行对比订正^[2,13]。

沙尘是东亚地区的一种重要气溶胶^[10]。我国沙尘暴区属于中亚沙暴区的一部分^[14],其中,西北大部分地区,整个华北地区,东北地区西部,都是沙尘灾害的多发区域,而沙尘灾害的影响区域则远远大于上述范围。出现沙尘暴的地区交通运输,环境治理都受到不利影响,个别地方甚至造成人员伤亡。高速公路交通和民用航空的迅速发展,使得同样沙尘天气对国民经济造成的直接和间接损失大幅度增加^[15]。

目前中国已经计划和开展一些重大的科学计划,在气溶胶科学上作出中国科学家的贡献。中国气象局在2001年开始建设中国气溶胶观测网络CAeroNet,在北方9个省市建立了20个沙尘暴监测站;设有太阳光度计(CE318-2)、能见度仪等先进仪器和设备。计划通过实时观测得到的数据,建立起一个完整的沙尘暴监测、预警系统,其中包括沙尘对亚洲各国的气候影响,来提高沙尘暴天气预报的准确性和时效性^[10,13,14]。

CAeroNet采用CIMEL公司的CE318-II型自动太阳光度计。其地基观测可以获取高精度的观测信息。目前在卫星观测和其它地基观测中,往往都采用CIMEL光度计资料来订正或检验反演结果。CIMEL光度计在无法识别大气条件的状况下自动连续观测,其反演结果易

受到定标、云等因素的影响；同时，仪器观测过程中产生的原始数据必需经过一系列反演计算才能获得有效信息，一定程度上制约了该仪器的自动监测功能。因此，需要一个高效全面的分析软件来实时处理和分析这些观测资料，使该仪器在沙尘暴的监测预警中发挥实效。同时从多方面提高反演结果的质量和利用率，对地基观测本身和卫星资料订正方面，都有着极其重要的意义。

本文研制的“基于CE318太阳光度计的沙尘监测预警系统”，首次实现了对该仪器观测资料的实时、自动反演计算及结果显示。在气溶胶观测研究、特别是在我国北方沙尘天气的监测预警中，凸显了该仪器实时观测的优势。进一步，采用该软件，结合地面气象资料和能见度仪资料，本文对太阳光度计应用中的一些实际问题和锡林浩特地区的沙尘监测预警进行了分析讨论。

1.2 国内外研究进展

IPCC报告第三次报告指出，目前人们在准确定义许多不同气溶胶直接辐射效应方面取得了显著进展。通过地基观测、卫星观测，和气溶胶辐射模式模拟，可以对多种气溶胶的成分进行定量估计，并对其辐射强迫范围进行估计。然而，不确定性仍然很大。这主要源于对大气气溶胶浓度和辐射特性，以及各类气溶胶比例进行确定依然存在困难。同时，估算气溶胶的间接辐射强迫仍有困难。气溶胶参与大气，特别是云中的物理过程和化学反应，其辐射强迫不仅依赖于它们的空间分布，而且依赖于它们的粒子大小，形状，化学组成以及水循环中的相关因子（如云的形成）^[7]。IPCC第4次报告指出各类气溶胶（主要包括硫酸盐、有机碳、黑碳、硝酸盐和沙尘）共同产生冷却效应，产生 -0.5 [-0.9 至 -0.1] 瓦/平方米的总直接辐射强迫，以及 -0.7 [-1.8 至 -0.3] 瓦/平方米的间接云反射辐射强迫^[16]，但气溶胶研究中的主要问题依然存在。

1.2.1 气溶胶地基观测的发展

气溶胶研究强烈依赖于观测数据的获取。地基观测由于其精度最高[12]，最易于维护而迅速发展。

目前可以从光度计观测获得覆盖20世纪大部分时间段的气溶胶光学厚度记录，其中大多数记录是特定站点资料。同时，这些广泛分布站点的观测资料，以及气溶胶观测网，对分析气溶胶的传输路径、分布，以及长期变化趋势贡献重大。

较早的对大气气溶胶的地基观测由美国Smithsonian环境研究中心开展, Roosen等[17](1976年)对其1905-1948年北非与南美地区的分光辐射计资料进行了分析, 指出二十世纪上半期, 除火山爆发外, 偏远地区及高海拔地区气溶胶对全球大气气溶胶载荷及输送无明显影响。Shaw[18]采用1912-1982极地地区手持式太阳光度计资料分析认为, 南极区无污染, 北极地区3、4月大气光学厚度由于北极霾而增加, 其精度达到0.04以上。Volz[19]采用欧洲中心资料(1961-1965年), 研究Uppsala(瑞典东南部城市60° N)地区气溶胶光学特性, 指出北极霾是由人类活动引起的近期现象, 其计算结果在500nm通道的精度为0.04。Herber[20]等人公布了南极洲沿海地区结合太阳光度计和卫星观测获得的长期资料(1956-1992), 清晰显示了火山爆发对平流层气溶胶载荷的影响。早期采用太阳光度计观测大气气溶胶光学特性的研究多集中于极地区和高海拔地区等大气质量较好的区域。

20世纪80年代, 针对沙尘气溶胶的地基观测迅速发展, 基于太阳光度计的多站点观测和联网观测大量涌现。国外的研究主要集中于撒哈拉沙漠地区的荒漠草原, 我国则较多关注北方沙尘天气多发地区。D'Almeida等^[21, 22]采用西非干旱地区多波段太阳辐射计资料, 分析了晴天、大风浮尘和沙尘暴三种不同天气条件下的沙尘气溶胶的谱分布情况, 基于米散射理论, 反演了0.3-40微米光谱区间的气溶胶辐射特性, 指出在忽略大气状况时气溶胶吸收和散射特性主要与大粒子有效散射直径有关, 几乎不依赖于直射辐射光谱范围, 单次散射反照率和不对称因子对直射辐射最为敏感。更进一步, 他对当地沙尘气溶胶输送进行了数值模拟, 指出其沙尘气溶胶60%向南输送到达几内亚湾, 28%向西到达赤道北大西洋, 12%向北到达欧洲; 相当一部分沉降到大西洋和地中海成为深海沉积物。Holben等^[23]采用西非荒漠草原地区太阳光度计资料, 目的是通过分析当地气溶胶光学特性对遥感资料进行订正, 指出当地气溶胶光学厚度表现出强烈的日变化, 且与干湿季无关, 波长指数与气溶胶光学厚度显示出良好的负相关性, 同时对结果检验指出, 其数据精度达到0.02。邱金桓等^[24]结合多波段太阳光度计和激光雷达, 对北京地区1983-1984年观测结果进行分析, 研究了大气柱气溶胶光学厚度、谱分布、折射率、粒子浓度等气溶胶光学特性, 分析其季节变化规律特别是春季分布特征, 指出气溶胶谱分布呈双峰结构, 0.1-10微米间谱分布较符合Junge谱。Ben.Mohamed^[25]采用尼日尔1986-1987年太阳光度计资料, 对西非荒漠草原地区的大气气溶胶进行了分析, 数据精度达到0.05, 结论指出了卫星观测的必要性, 同时指出卫星资料必须通过可靠的地基观测资料来订正。

随着对大气气溶胶、特别是对人为气溶胶的日益关注, 对气溶胶的研究不断发展深入, 精度也普遍提高。Gushchin[26]通过1972-1984年在前苏联30多个站点, 采用340-627nm光谱

通道观测资料, 区分了乡村、城市/工业、海洋/大陆、沙漠气溶胶特点, 其反演结果精度为 0.03。Holben 等[12]通过 AERONET 全球观测网多站点 CE318A 太阳光度计资料(1993-1996), 分析了其中 9 个具有典型气候特征站点的气溶胶光学特征, 包括气溶胶光学厚度、可降水量及波长指数等, 数据质量可信, 计算结果精度达 0.015; 由此总结了热带生物质燃烧、北方针叶林地区、中纬度湿润地区、中纬度干旱地区、海洋站点、沙漠站点和背景大气站点的气溶胶统计特征。夏祥鳌[86]等采用 AERONET 在中国站点的资料, 分析指出中国北方地区, 沙尘天气期间大气气溶胶表现出中性或异常消光特性, 而人为排放源也是导致气溶胶光学厚度偏高的原因, 同时根据沙尘气溶胶实部偏大、虚部偏小的光学特点, 指出沙尘活动影响了下游地区气溶胶的辐射强迫效应。

当前, 随着人们对空气污染和气候变化的日益关注, 有关大气气溶胶的监测和研究也更加广泛深入。大气气溶胶卫星观测迅速发展, 需要高质量的地基观测资料对比订正[27]; 对气溶胶模式的研究逐渐深入, 但对气溶胶辐射强迫, 特别是间接辐射强迫的不确定性依然存在[7, 16]。因此, 气溶胶的地基观测, 特别是联网观测, 作为研究气溶胶科学问题的重要观测基础而迅速发展起来。当前国际上有两大气溶胶光学特性观测网络[10]:

(1) 美国气溶胶自动观测网 AERONET (Aerosol Robotic Network), 采用 CIMEL 太阳光度计, 全球站点超过 300 个。

(2) 世界气象组织 (WMO) 的全球大气观测计划 GAW (Global Atmosphere Watch Programme), 采用精确滤光辐射计。

两个网络将在世界范围内互相弥补观测的空白区域, 协作组成一个完整的全球气溶胶光学厚度观测网络。各国气溶胶观测网络[10]的建设情况如表 1-1:

表 1-1 各国气溶胶观测网概况

气溶胶网络	覆盖面(站点数)	采用仪器 (数量)
法国气溶胶网络 Photons	法国, 非洲、欧洲 部分地区 (25)	法国 CIMEL 太阳 光度计 (35)
中国气溶胶观测网 CAeroNet	中国 (20)	CIMEL 光度计
加拿大太阳光度计网络 AeroCan	加拿大 (10)	CIMEL 光度计
澳大利亚气溶胶地基网络 AGSNet	澳大利亚 (6)	CIMEL 光度计
日本气溶胶/辐射观测网络 Skynet	日本、中国、 蒙古国、泰国 (14)	日本 Prede8 波段太 阳光度计

1.2.2 我国气溶胶光学特性研究

利用气象台站的短波辐射通量资料反演气溶胶的等效光学厚度,该方法可以充分利用气象台站过去几十年的历史资料,从而获得AOD几十年来的变化趋势。为全球气候变化中大气气溶胶辐射效应评估提供大量资料,进而分析气溶胶变化的自然和人类活动原因。

罗云峰等^[28, 29]由中国47个太阳辐射站观测的资料反演了750nm气溶胶光学厚度,发现从1961-1990年中国气溶胶光学厚度呈现增加趋势,韩永等^[30]采用阿克苏、吐鲁番和福山的总直接太阳辐射资料,指出气溶胶光学特性与沙尘粒子的迁移性相适应;两者研究资料都不包括严重沙尘天气时的太阳直接辐射资料。周秀骥^[84]利用中国太阳辐射站观测的资料开展了中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟研究,指出气溶胶在中国有一定的降温作用。

我国20世纪70年代开始建立宽带多波段太阳光度计遥感大气气溶胶光学厚度的观测研究并反演气溶胶粒度谱,这类观测一直持续至今,提供了全国多个站点气溶胶光学厚度的气候性资料。在扩展气溶胶特征遥感的原理方法方面:吕达仁等^[31]提出了同时测量直接消光和小角散射确定气溶胶光学厚度和谱分布的方法,邱金桓等^[32]研究认为该方法可以较好地提供0.1~10 μm 粒径范围的气溶胶谱分布信息;之后还提出了利用前向散射观测反演气溶胶折射率。李放等^[33]指出单纯利用多波段光度计消光信息很难反演气溶胶粒子的相函数、复折射率等多个特性,提出通过研究两个波段消光差反演气溶胶复折射率。黎洁等^[34]利用多波段光度计观测太阳直接辐射与太阳所在地平纬圈天空亮度的相对分布,反演气溶胶光学厚度和相函数,进而推算大气气溶胶的粒子尺度谱和气溶胶粒子折射率。进一步,赵增亮^[35]等提出完全通过测量多个天顶角方向的天空亮度相对分布,反演气溶胶光学厚度和相函数,避免了仪器定标。邵鸿飞等^[36]从理论上提出,利用“频率相近,但气体吸收系数相差很大”的两个波段,构造一个无量纲量,可以使地面反照率的影响减至最小。但是,利用天空亮度分布遥感气溶胶特性可以充分利用气溶胶的散射信息,只适用于大气水平均匀的情况——这种条件只有在晴朗的天气情况下才能满足,不适合污染较为严重的天气情况,如沙尘暴天气等。祁栋林^[37]等根据1997年瓦里关山大气本底站的宽带分光太阳直接辐射仪器观测资料分析该地大气浑浊度特点。邱金桓^[38]等提出从晴天全波段太阳直接辐射信息确定0.7 μm 波长气溶胶光学厚度的方法。1997年他对上一方法改进^[39],提出利用全波段太阳短波直接辐射和能见度信息,同时反演整层大气气溶胶光学厚度和平流层光学厚度。

近年来,窄带多通道太阳光度计,因其较高的观测精度及丰富的观测资料而得到迅速

的应用,如法国CIMEL公司的CE318型太阳光度计。全球气溶胶观测网AERONET采用该仪器在全球布点超过300个,我国气溶胶观测网CAeroNet于2001年在北方20个站点引入该仪器,计划通过一系列研究来提高沙尘暴天气预报的准确性和时效性。2005年起我国南方地区,如临安、南京、上海等地也有多个观测站点引入了该型号太阳光度计。张玉香^[40]等利用CE318光度计分析北京地区大气气溶胶光学厚度,得到约50天的气溶胶光学厚度和Junge参数等大气光学特性数据,给出了北京地区气溶胶光学特性分布特征。李霞等^[41]利用布设于塔里木盆地腹地塔中站和盆地西南边缘和田站的2部光度计2002年6月至2003年11月期间的探测结果,结合地面气象实测资料,指出塔中、和田气溶胶光学厚度随波长的增大多呈现减小趋势,2站气溶胶光学厚度的日变化基本保持对称的抛物线形,波长指数 α 随能见度的变化趋势说明弱沙尘天气下,大气中主要弥漫着小粒径的气溶胶颗粒,而强沙尘天气则以大粒径为主。初步提出了依据气溶胶光学厚度判断沙尘天气强度的标准。同时指出气溶胶光学厚度与水平能见度之比值能够较全面地考虑水平和垂直两个方向的要素变化,衡量沙尘天气强度更具有合理意义。沈建国等^[42]选取内蒙古额济纳旗、乌拉特中旗、东胜、朱日和、锡林浩特5个站的几次沙尘天气过程和晴朗天气下CE-318太阳光度计资料,计算出大气气溶胶光学厚度,指出在沙尘天气发生过程中,气溶胶光学厚度是一个相当敏感的变量,可以很好的反映沙尘输送过程。此外气溶胶光学厚度与大气稳定度也有一致的日变化趋势。因此,对于大气气溶胶光学厚度的监测可以为沙尘天气的预报提供较为准确的客观依据。

1.2.3 资料订正及精度检验的研究

地面观测站对大气气溶胶进行连续观测可以直接得到反映气溶胶浓度和时间变化的较为准确的信息,另一方面,利用卫星遥感可以了解大气气溶胶输送及浓度变化的宏观分布状况。自从20世纪70年代以来,利用卫星资料可见光通道遥感气溶胶不断被尝试,但始终存在一些难题,最主要的难题是如何确定地表反射率的问题,特别是复杂地形情况下^[43]。目前从业务算法可以得到 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 的星下点分辨率,基本满足了全球气候研究的需要,并且也提供了天气尺度或者区域尺度有关城市大气污染的信息^[44-46],然而,气溶胶反演过程中还是存在来源于地表反射率估计、气溶胶模型判断、云的识别等方面的误差。最终结果与地面太阳光度计观测的对比一般是检验这些产品最好的方法^[12]。NASA 在全球布设的AERONET (Aerosol Robotic Network),目的之一就是对卫星遥感产品进行检验和订正^[12]。

毛节泰^[47]等结合安徽光机所的8波段自动跟踪太阳光度计观测资料,对GM S5静止卫星

遥感资料进行了反演和检验,对单站点资料分析指出,卫星接收到的表观反射率对下垫面反射率的变化十分敏感;张军华等^[48]进一步结合多站点光度计资料分析指出,卫星资料反演气溶胶光学厚度时,下垫面反射率、气溶胶模型都对反演结果有重要影响。尤其是气溶胶模型的选择是一个关键性的问题,提出采用多波段光度计与气象卫星进行同步观测,从而采用多波段光度计资料来验证卫星遥感的方法和结果。李成才^[43, 49]等采用香港地区2001-2003年地面太阳光度计观测资料,对MODIS卫星遥感结果进行对比和校准,来分析观测区域的气溶胶类型,确定了地表反射率并反演了气溶胶光学厚度的高分辨率(星下点1 km)分布;同期,他采用北京地区2001-2002年BB型10波段太阳光度计资料对MODIS气溶胶产品进行了检验,认为对气溶胶类型判断有偏差或对地表反射率的估计偏小,可能是MODIS遥感结果偏小或偏大的主要原因。唐家奎^[50]等提出了利用MODIS双星数据协同反演陆地大气气溶胶光学厚度的新方法,对北京及周边地区进行的反演应用研究中,采用AERONET地面观测资料对反演结果进行了检验。

值得注意的是,对卫星资料进行检验订正时,太阳光度计仪器自身的稳定性和观测精度也将是影响气溶胶光学厚度精度的因素,测量中所使用的太阳光度计需要精确的定标^[51]。

当前采用太阳光度计观测大气气溶胶光学特性的研究中,法国CIMEL公司的CE318系列太阳光度计观测结果质量得到一致认可,NASA全球气溶胶观测网AERONET及其合作者采用该仪器在全球布点至2007年底已超过300个。当前地基观测中各类辐射计、光谱仪及其它类型太阳光度计的观测结果往往通过与CIMEL光度计反演结果对比,或直接与AERONET网公布的反演结果对比,以检验反演精度,有研究认为,CIMEL太阳光度计反演结果精度可达0.015^[12]。

刘新昱等^[52]利用太阳—大气紫外光谱辐射计(SAUVS)北京地区观测数据,介绍了反演大气气溶胶光学厚度的一种方法,并将反演结果与全球气溶胶监测网络(AERONET)北京站的资料对比,得到反演结果基本合理的结论。辛金元等^[2]利用便携式LED太阳分光光度计,依托中国生态研究网络(CERN),建立地基观测网,建网过程中采用Langley定标法结合传递定标法对所有光度计进行定标误差分析,并将反演结果与“当前最为先进的CIMEL光度计”观测结果进行比较,验证了LED分光光度计性能与建网所采用定标方法的可靠性。

1.3 主要研究内容

本文介绍了自行研制的基于CE318太阳光度计的沙尘监测预警系统。它基于面向对象

的技术,包括实时监测软件RealTime和历史资料处理软件TimeShow。软件RealTime实时解读CE318太阳光度计观测中传回计算机的海量数据,自动的实现大气气溶胶光学厚度(AOD)、波长指数、大气浑浊度等参数的计算、显示和存储功能。在国内沙尘气溶胶观测研究、特别是在中国北方沙尘天气的监测预警中,突显仪器自动观测的优势。解读光度计历史资料的软件Timeshow在计算相应气溶胶光学特性参数基础上,引入云处理方案提高反演结果质量,为进一步分析气溶胶粒子谱分布等光学特性提供了有效资料。系统能在有限程度上反映总云量的分布。与AERONET资料对比分析,认为该系统输出结果精度可信。

应用该软件,结合锡林浩特地区2006年CE318太阳光度计资料和地面气象资料,本文分析了云对我国北方太阳光度计观测精度的影响。对Langley法定标提出了通过引入插值法提高定标系数精度的方法,同时在保证反演结果质量可信的基础上,总结了该地区典型天气条件下气溶胶光学厚度(AOD)日变化特征,以及受到云影响的程度。统计结果表明,当地晴天条件下AOD日变化主要表现为早晨和傍晚数值较小的特点。红外波段通道反演结果显示AOD从春季向冬季递减的规律,可见光波段反演的AOD在春季出现最高值,并在9月再次出现高值。夏季受云的干扰,导致有效数据缺失较严重。总结了沙尘天气发生过程中气溶胶光学厚度随时间演变的特征,特别指出了对流单体、积云等对反演结果的干扰,并结合卫星资料作了对比说明。

在上述工作的基础上,本文提取内蒙古锡林浩特地区沙尘与灰霾天气,对比分析了太阳光度计资料和能见度仪资料,计算了TimeShow软件反演结果与能见度仪观测资料的相关性,发现两者在无云干扰条件下,变化趋势高度一致,从而提出结合大气柱气溶胶光学厚度和水平能见度两个方向要素的变化来提高预警精度,同时为提高多云沙尘天气的大气气溶胶监测精度提供了依据。同时,笔者计算了沙尘气溶胶不同分布情况下 $0.1-3\mu\text{m}$ 粒径区间的粒子谱分布。结果显示,该区间能灵敏反映大气气溶胶浓度变化,其反演结果可以作为监测沙尘天气的又一有力依据。在此基础上,本文初步提出了结合衡量锡林浩特地区沙尘天气强度的标准,以及预警阈值。

第二章 基于 CE318 光度计的沙尘监测预警系统

2.1 仪器介绍

2.1.1 CIMEL 太阳光度计简介

本文研究主要基于法国CIMEL电子公司的CE318型太阳光度计^[53]的直接太阳辐射资料。CE318型太阳光度计为自动的太阳和天空光谱扫描仪器,采用多通道干涉滤波,带宽为10nm,视场角1.2°,具有较高的测量精度和良好的稳定性。

(1)仪器型号

2004年以前,该仪器有两种型号:

CE-318-1标准模型: 1020-870-675-440-936-500-340-380nm通道;

CE-318-2极化模型: 1020-870P1-675-440-870P2-870-936-870P3 nm通道

(P: 极化通道)。

2004年以后, CIMEL太阳光度计有新的命名规则:

CE 318N (V, E, U) (B or P) (S or X) (1-9)。

V、E、U表示可见光波段、扩展波段、紫外波段, B、P表示基本波段、极化波段, S、X表示标准或其它(X)滤光片装置, 1-9表示Cimel光度计所安装的滤光片数。仪器有一个改良的传感器光学设计, 可进行机载数据处理。

2004年以前的两种型号可以用一个升级包转换成新型号。

(2)观测数据采集

仪器观测获得直射太阳辐射数据和天空扫描数据, 前者反演大气透过率、消光光学厚度、气溶胶光学厚度、大气水汽柱总量、臭氧总量等, 后者可反演大气气溶胶粒子尺度谱分布、气溶胶相函数等。

CE318型太阳光度计可以手动观测, 也可以自动观测。启动自动跟踪扫描观测时, 仪器的太阳和天空辐射的测量方式可以编程。一般8个光谱波段的太阳直射辐射测量需10s, 30s完成3次重复测量。3次重复测量方式为早晚仪器自校正测量和间隔15分钟的标准测量所采用的测量方式。自校正测量在大气质量数介于2到5时每变化0.25个大气质量数时测量一次, 在大气质量数介于5到7时每变化0.5个大气质量数时测量一次, 无数据缺失时, 一天测量17次。标准测量全天测量次数可变, 从早晨大气质量数降至2到下午大气质量数升至2的

时间段内，每15分钟测量一次。早期型号从早上大气质量数降至6开始工作，晚上大气质量数升为6停止工作。目前随着仪器传感器精度提高，仪器在大气质量数降至7时即可自动扫描。

(2)数据格式及应用

CE318光度计资料传回计算机后，保存并生成“*.K7”文件，这是内存映射文件，需要转化为ASC II 码文件才能使用。生成的ASC II 码文件包括一系列不同后缀名的文件，其意义如表2-1：

表2-1 CE318太阳光度计ASC II 文件一览表^[13]

文件后缀	文件内容
SSK	表示 8 通道 3 次 SUN 测量和 7 通道 3 次 SKY 测量
STA	表示仪器状态数据作扫描
BLK	表示暗电流数据
ALL	表示等高度扫描向左扫描半圈的数据
ALR	表示等高度扫描向右扫描半圈的数据
PPP	表示主平面极化通道扫描数据
PPL	表示主平面扫描数据
NSU	表示 8 个通道 3 次 SUN 测量数据

全球气溶胶观测网AERONET通过卫星传输、或由其联盟上传，实现光度计观测资料的采集。其官方网站<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>提供全球大多数站点资料的反演结果资料，以及基于这些资料的研究成果，但不提供原始数据。其AOD资料分为三个数据质量等级：1.0级（未筛选的）；1.5级（有云时的数据被筛选的）；2.0级（有云时的数据被筛选，且有质量保障）。事实上，站点的广泛分布及各站点气候的巨大差异，不可避免的限制了对站点资料的质量检验和维护，同时也限制了对各站点资料的实时分析。但另一方面，AERONET提供了一个公开的大型数据库，对全球气溶胶研究、卫星资料检验等都具有深远的影响。

2.1.2 测量中需要注意的问题

(1)定标

为保证准确得出气溶胶光学厚度，应特别注意对太阳光度计进行准确定标，并保持定标系数的长期稳定性。对应用于联网观测的光度计，统一标定与检测是保证观测网准确性

和网络数据有效性的一项基础工作。定标一般分为3类：Langley 定标法、传递定标法、标准定标法。

辛金元等^[2]研究指出，传递定标法观测地点与天气状况的同一性很大程度地避免了天气条件对光度计定标的限制，是对大量光度计联网观测进行统一标定和校对的一个有效方法。目前，Langley定标法是当前资料处理中被普遍应用，同时也被认为比较简单可行的一种方法。

(2)吸收气体影响

CE318地面测得的太阳直接辐射数据，在940 nm附近水汽吸收带须计算水汽吸收消光，且Rayleigh 散射和气溶胶散射光学厚度相对独立，所以936 nm的气溶胶光学厚度通过其他通道(如870 和1 020 nm)内插得到，如使用牛顿插值法。事实上，目前很多反演计算中对吸收气体的考虑较少，基于各类光谱辐射计的精度，忽略吸收气体对太阳直接辐射的影响在一定范围内可以满足对数据质量的要求。Mitchell 等通过对比CE318 与SPOIA 辐射计、多滤波器旋转影带辐射仪MFRSR的大气AOD计算结果指出，尽管用CE318确定气溶胶光学厚度时，存在NO₂ 和O₃ 等吸收气体对太阳直接辐射吸收的不确定性，但用CE 318 来确定大气气溶胶光学厚度仍然是可行的。

(3)资料的不连续及散射光的滤除

采用CE318型太阳光度计，且启动自动跟踪扫描观测功能时，仪器在有降水情况下，强沙尘暴天气条件下，云层很厚、大气透过率无法满足仪器工作要求时，都会停止工作，或保存观测结果为无效值0，这对连续观测不利。

邱金桓等^[85]还通过研究能见度、气溶胶云的光学厚度、大气柱液态水含量后指出，当光学厚度增大主要由高空输入和地表刮起的沙尘粒子的大量增多而引起时，光度计探测的光强包含太阳直射光和相当份量的多次散射光，后者应该滤除，否则AOD偏小。邱金桓等通过手动观测减小散射光的影响。

(4)云的影响

太阳光度计手动观测，如果有云等干扰因素影响，则可以停止探测。但CE318光度计启动自动跟踪扫描功能后，在无法识别大气条件的状况下连续观测。因此人工筛选数据需要耗费大量的时间和精力。

A. Smirnov等^[54]提出了云处理方案来辨别观测中受云干扰的数据，进而剔除。该方法应用于全球气溶胶观测网对AERONET，一定程度上提高了数据精度。云处理方案主要包括数据质量检验、3 次重复测量稳定性规则、日稳定性检测规则、平滑规则、3 σ (标准偏差)

规则等一系列算法。

2.2 系统功能及界面介绍

“基于 CE318 太阳光度计的沙尘监测预警系统”基于面向对象技术，采用 Microsoft Visual C++ 6.0 编程环境，在 Windows xp 操作系统下运行。

系统包括实时监测软件 RealTime 和历史资料处理软件 TimeShow。软件 RealTime 实时解读 CE318 太阳光度计观测中传回计算机的海量数据，自动的实现大气气溶胶光学厚度 (AOD)、波长指数、大气浑浊度等参数的计算、显示和存储功能，无须人工干预。在国内沙尘气溶胶观测研究、特别是在中国北方沙尘天气的监测预警中，突显仪器实时观测的优势。解读光度计历史资料的软件 Timeshow 在计算相应气溶胶光学特性参数基础上，引入云处理方案提高反演结果质量，为进一步分析气溶胶粒子谱分布等光学特性提供了有效资料。

RealTime 软件首次实现了太阳光度计资料的实时自动解读，切实达到了对大气气溶胶，特别是沙尘气溶胶的实时监测。配套开发的 Timeshow 软件，为精确分析 CE318 太阳光度计历史资料，研究气溶胶光学特性提供了有效工具。

2.2.1 反演原理

根据 Beer-Lambert-Bouguer 定律，在地面上直接测得的太阳辐射 $E(W/m^2)$ 在给定波长上：

$$E_{\lambda} = E_{0\lambda} R^{-2} \exp(-m\tau_{\lambda}) T_{g\lambda} \quad (2-1)$$

其中 E_0 为大气外界太阳辐照度(太阳常数)， R 为测量时刻的日地距离， m 为大气质量数（约为天顶角 θ 的正切： $\sec\theta$ ）， τ_{λ} 为大气垂直总光学厚度， $T_{g\lambda}$ 为吸收气体透过率。若用仪器输出电压 V_{λ} 代表 E_{λ} ，公式 (2-1) 为^[13, 55, 56]：

$$V_{\lambda} = V_{0\lambda} R^{-2} \exp(-m\tau_{\lambda}) T_{g\lambda} \quad (2-2)$$

式中 $V_{0\lambda}$ 是定标常数。

由于 Beer 定律适用于单频辐射，而水汽吸收在很多窄波段中都存在，所以水汽透过率通过对水汽吸收线进行数值积分获得。对无水汽吸收的波段，大气垂直总消光光学厚度 τ_{λ} 可表示为：

$$\tau_{\lambda} = \tau_{r\lambda} + \tau_{ae\lambda} + \tau_{ab\lambda} \quad (2-3)$$

$\tau_{r\lambda}$ 为分子散射 (Rayleigh) 光学厚度, $\tau_{ae\lambda}$ 为大气气溶胶光学厚度, $\tau_{ab\lambda}$ 为大气中吸收气体 (如臭氧、二氧化氮等) 的光学厚度。

Rayleigh 散射光学厚度通过地面气压测值计算, 如式 (2-4) :

$$\tau_{r\lambda} = \frac{P}{P_0} \times 0.0088\lambda^{-4.05} \quad (2-4)$$

P_0 为标准大气压, P 为实际大气压, λ 单位为 μm 。

在可见光、近红外波段, 大气中主要存在臭氧和水汽吸收。对于非水汽吸收通道, $\tau_{ab\lambda}$ 的计算本系统只考虑臭氧的影响。臭氧吸收所造成的整层大气光学厚度可表示为^[58]:

$$\tau_{O_3\lambda} = k_{O_3\lambda} u_{O_3} m_{O_3} \quad (2-5)$$

其中 $k_{O_3\lambda}$ 为吸收系数, u_{O_3} 为铅直气柱的臭氧含量, m_{O_3} 为臭氧的相对大气质量。整层大气臭氧含量 u_{O_3} 可以直接引入卫星反演结果, 也可以根据修正的 Heuklon 臭氧模式^[57] 计算, 如式 (2-6), 本系统无法实时载入卫星资料, 因此采用第二种方法。

$$u_{O_3} = 235 + \{150 + 40 \sin[0.9865(d_j - 30)] + 20 \sin[3(\zeta + 20)]\} \cdot \sin^2(1.28\phi) \quad (2-6)$$

其中 d_j 为儒略历日, ζ 和 ϕ 为站点观测点经纬度。

在大气相对稳定条件下, 进行不同太阳天顶角情况下的太阳直接辐射测量, 仪器的输出 V_{λ} 是 m 的函数, $V_{0\lambda}$ 即从一系列测值外插到 m 为 0 时 V_{λ} 的结果。根据 $\ln V + \ln R^2$ 与 m 画直线, 直线的斜率就是垂直光学厚度 $-\tau_{\lambda}$, 截距就是太阳辐射计在大气外界测得电压信号 $V_{0\lambda}$, 这就是 Langley 法。

一旦获得了比较精确的仪器定标常数 $V_{0\lambda}$, 对观测数据的处理可以采用瞬态法, 即利用某时刻获得的太阳辐射测值 V_{λ} 和预先标定好的定标常数 $V_{0\lambda}$, 就可以得到该时刻大气柱总的消光光学厚度。计算公式如式 (2-7), 进而获得气溶胶光学厚度。

$$\tau_{\lambda} = \frac{1}{m(\theta)} \ln \frac{V_{0\lambda}}{V_{\lambda} R^2} \quad (2-7)$$

在气溶胶 Junge 谱分布^[13, 58]的假设下, Angstrom 指出气溶胶光学厚度可表示为参数 k

和 γ 的函数形式:

$$\tau_{ae\lambda} = k\lambda^{-\gamma+2} \quad (2-8)$$

式中 k 为 Angstrom 大气浑浊度系数, γ 为 Junge 参数。式 (2-8) 也可写成以下形式:

$$\tau_{ae\lambda} = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (2-9)$$

α 即波长指数, 它与气溶胶的平均半径有关, 平均半径越小, 其溶胶的散射特性越趋近于分子散射, α 越趋近于 4。使用多个波段测量得到的气溶胶光学厚度, 对式 (2-9) 进行最小二乘法拟合, 可得到 β 和 α 。在此基础上, 又可以求出其它波长处的气溶胶光学厚度。

2.2.2 功能及界面

基于 CE318 太阳光度计的沙尘监测预警系统, 能应用于 CE-318-2 和 CE-318-N 型光度计的实时监测业务及历史资料分析。实时监测软件 RealTime 和历史资料处理软件 TimeShow 界面如图 2.1。

RealTime 软件左侧显示各通道气溶胶光学厚度 (AOD), 浑浊度参数 β 及波长指数 α 的实时变化曲线。其中, 横坐标表示时间 (北京时), 纵坐标轴对应各个参数值, 采用不同颜色加以区分。红色、黄色、绿色、蓝色纵坐标轴分别对应 1020nm、870nm、670nm、440nm 通道 AOD 值, 变化范围都为 0~3。紫色、青色纵坐标 (分别标识于最下方横坐标轴左右两侧) 对应浑浊度参数 β 和波长指数 α , 变化范围分别为 -1~4, -0.5~2。标识于横坐标左侧的纵坐标轴, 其对应的参数中 β 随大气中气溶胶质点总量而变^[19], 与 AOD 呈现一定正相关。界面右侧显示各通道 AOD (包括水汽通道 936nm)、 α 、 β 以及大气质量数的数值, 相应反演结果以文本格式实时保存到电脑中指定位置。RealTime 软件包括三个菜单: 开始实时显示, 退出实时显示和帮助菜单。设置相应参数后即可启动实时监测, 操作便捷。

Timeshow 软件是配套开发、用于处理历史资料的。通过引入云处理算法, 可以获得不同质量等级的反演结果, 进而为分析大气气溶胶粒子谱等参数做好了准备。

系统读取基于太阳直射辐射的自校正测量数据和标准测量数据数据来计算气溶胶光学厚度, 对 CE-318-2 型太阳光度计, 选取 ASCII 文件后缀名为 SSK 的文件; 而对 CE-318-N 型光度计, 选取后缀名为 NSU 的文件。实时监测软件 RealTime 运行时, 保留原始文件 "*.K7" 文件, 该文件包含所有的原始观测信息且文件很小, 适合于数据的长期保存和维护; 同时通过设置参数, 软件可以删除相关 ASCII 文件以节省留磁盘空间。目前中国气溶胶观测网络 CAeroNet 获得的 CE318 太阳光度计资料通过气象系统的数据网络, 实现数据的自动采

集和远程传输。

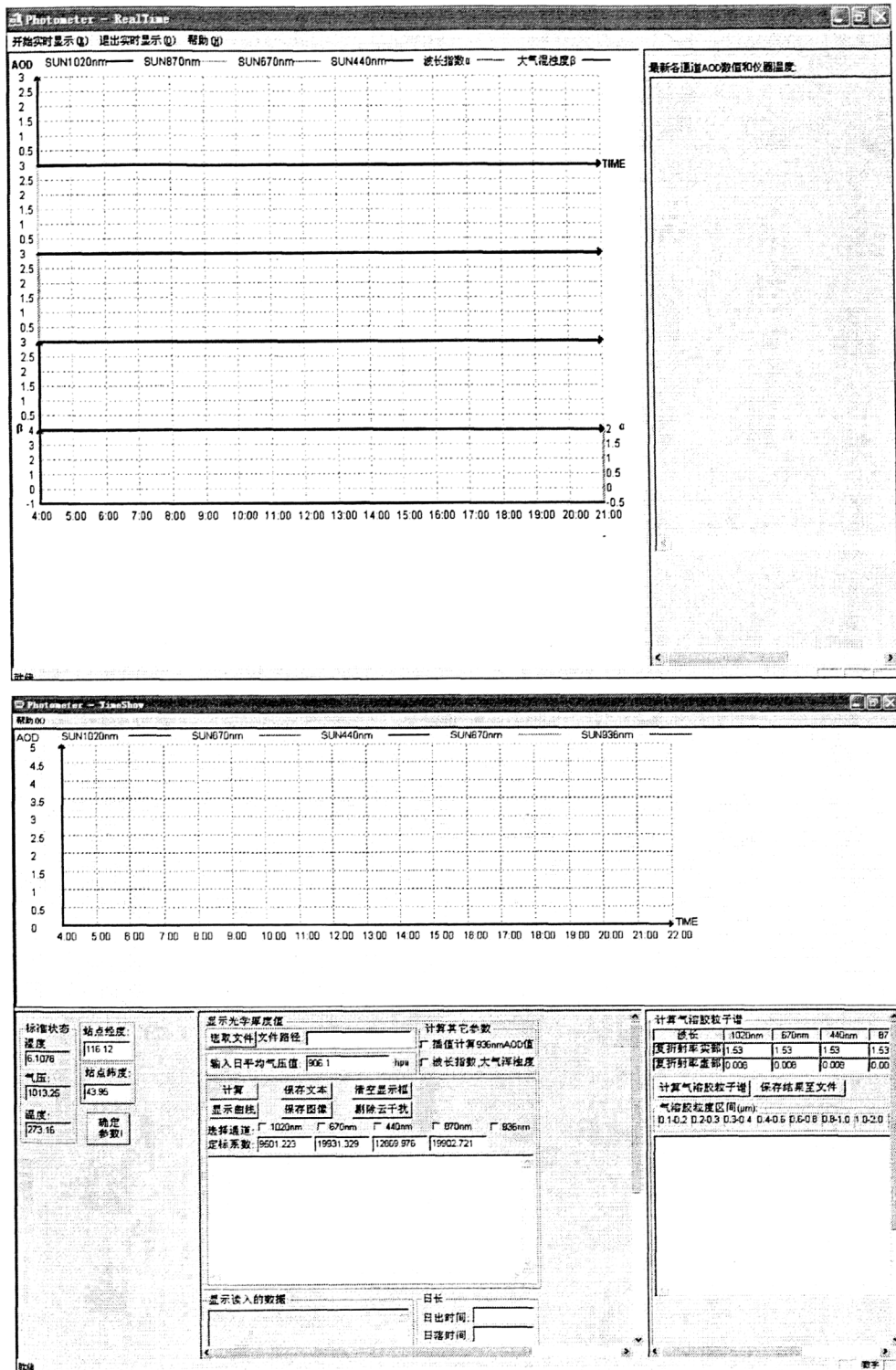


图2.1 基于CE318太阳光度计沙尘监测预警系统界面(a) RealTime软件(b)TimeShow软件

2.3 软件反演结果精度检验

为检验本系统反演方法的精度，本文采用南京信息工程大学（NUIST，东经 118.72°，北纬 32.20°）07 年 9 月 6 日观测数据，以 RealTime 软件的输出结果（取 1020、870、670、440nm 四通道），与 AERONET 网上公布的 NUIST 站点同日计算结果作比较，检验结果两者有较好的一致性（如图 2.2 所示）。

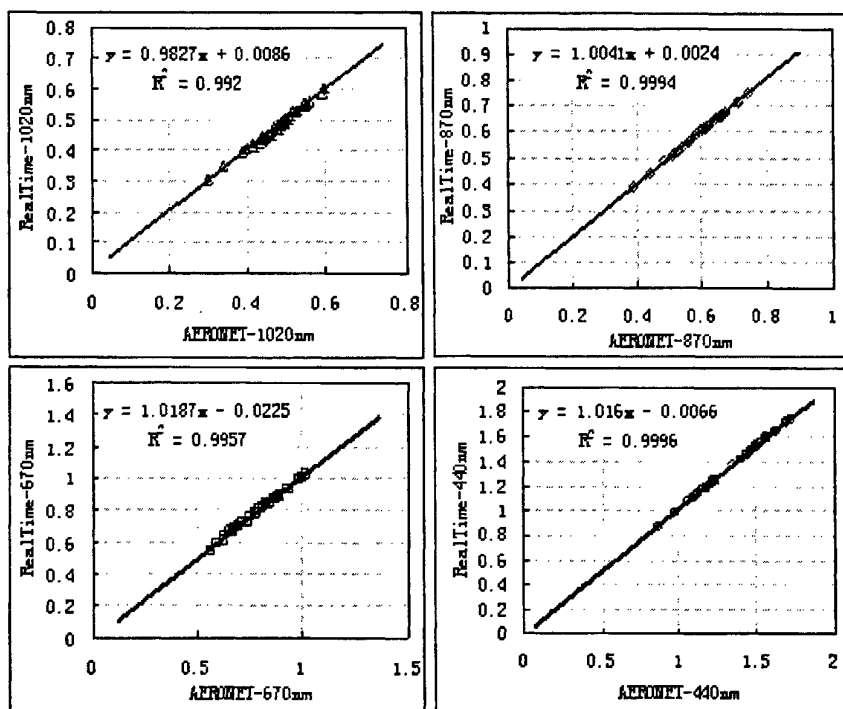


图 2.2 RealTime 系统结果与 AERONET 比较

(a)1020nm 通道 (b)870nm 通道 (c)670nm 通道(d)440nm 通道

如图 5，以 AERONET 数据为横轴，RealTime 系统输出结果为纵轴，作线性相关分析，两者误差在 0.02 范围内。因此，RealTime 系统输出结果与 AERONET 网上公布的计算结果有很好的一致性，其反演算法的精度可信。两者差别主要源于对微量气体和痕量气体的吸收作用采用了不同的处理方式，同时也受到计算机及编译器类型的影响。

TimeShow 软件计算结果与 RealTime 软件的输出数据高度一致，因而其初步运行结果可信，在此基础上引入了云处理方案。

2.4 软件对云干扰的处理能力

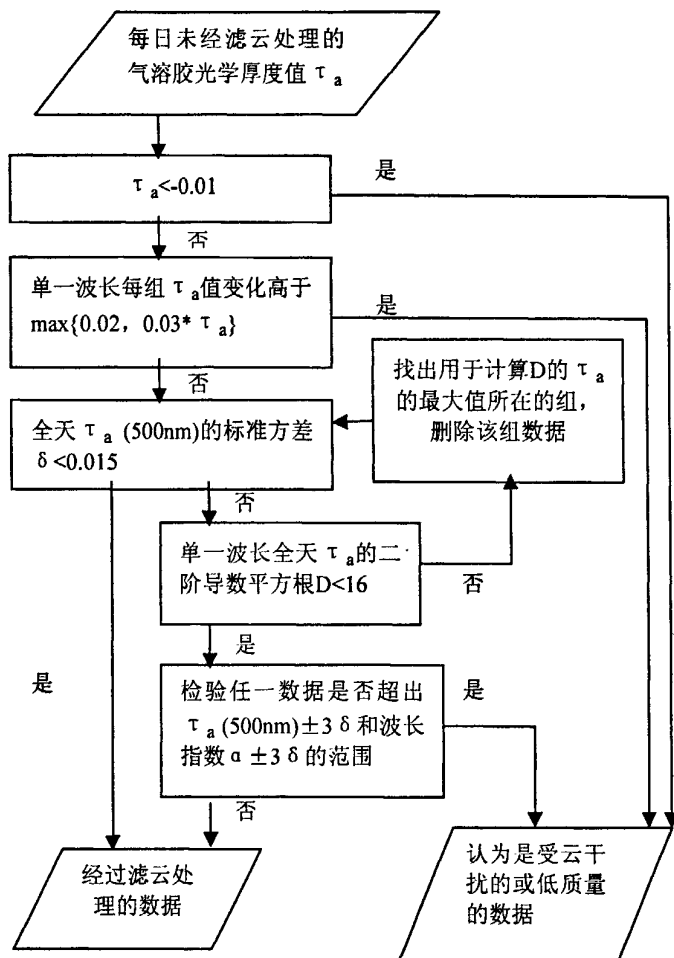


图2.3 云处理方案流程图^[54]

CE318 在无法识别大气条件的状况下自动连续观测^[13]，数据易受云干扰。本系统采用 A. Smirnov 等对 AERONET 使用的云处理方案^[54]提高数据质量，计算流程图如图 2.3。

对于不存在 500nm 观测通道的 CE318 光度计，流程图出现的 500nm 可用 440nm 代替^[54]。由流程图可知，在计算 D 值时，需要用到单一波长全天 τ_a ，也就是说，只有当接收到的数据达到一定数量，才能得到可靠的 D 值。在早上实时观测初始阶段是不满足该方案要求的，该方法更适合处理历史资料。同时，通过计算 D 值筛选数据后，如果全天资料只剩下一组或两组，则当日数据无效，不能采用^[54]。

图 2.4 为 TimeShow 软件对内蒙古锡林浩特 2006 年 7 月 12 日资料采用云处理方案前后

的 AOD 时序图。对比当日地面气象记录(表 2-2)，受云干扰的数据被剔除。图 2.4(a)中 10:00-12:00 数据缺失是由于光度计传回的观测数据为无效值 0。

表2-2 锡林浩特地区06年7月11日全天空总云量变化(目测记录)

时 间	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
总 云 量	10 ⁻	10 ⁻	5	3	1	7	7	10 ⁻	2	1	3	6	5	4	1

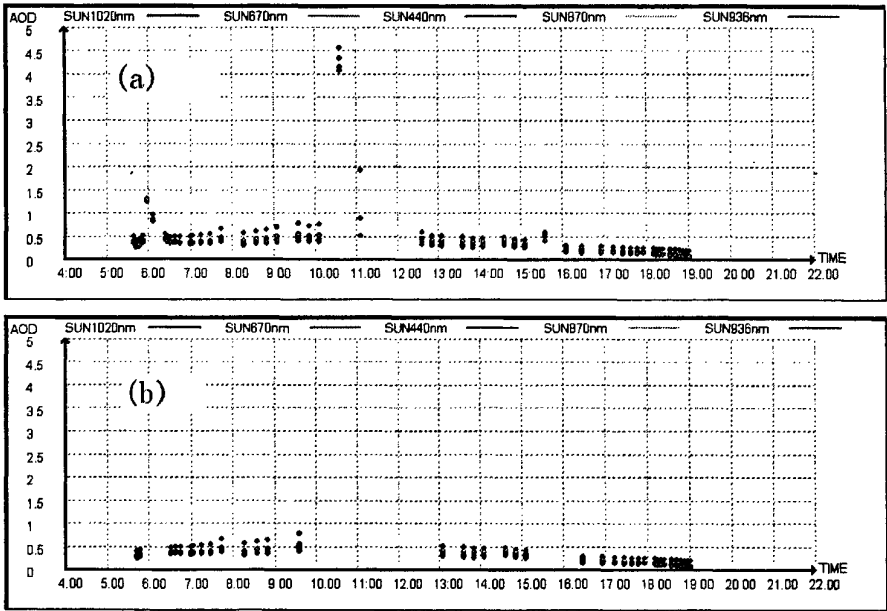


图2.4 采用云处理方案前(a)后(b)对比

2.5 不同天气条件下运行情况

实时监测软件 RealTime 对各类天气情况有较好的反映。本节选取了不同天气条件下 RealTime 软件输出的气溶胶光学厚度时序图。其中图 2.5，图 2.6 由内蒙古锡林浩特地区实际观测资料模拟实时环境所得；图 2.7 于南京地区实时观测所得。

(1)北方地区晴天

图 2.5 显示了锡林浩特地区 2006 年 9 月 16 日晴天天气条件下 RealTime 软件运行情况。此时所得时序图曲线平滑，各曲线颜色与左侧纵坐标轴颜色一一对应。

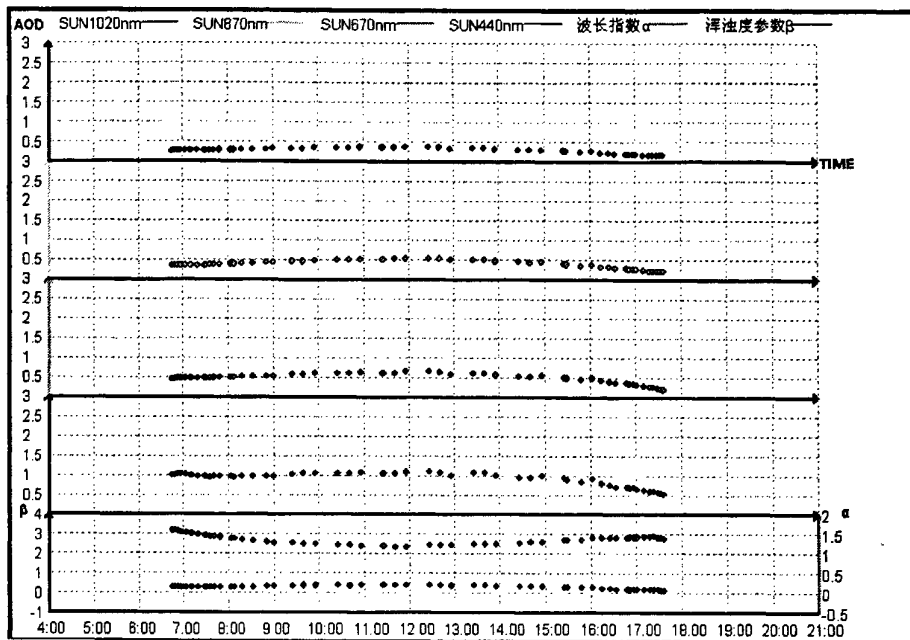


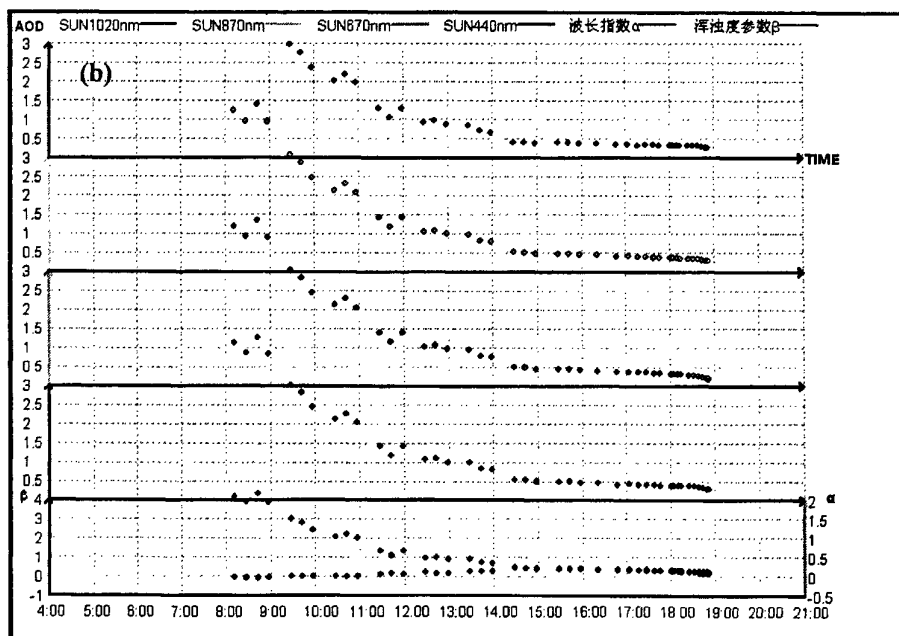
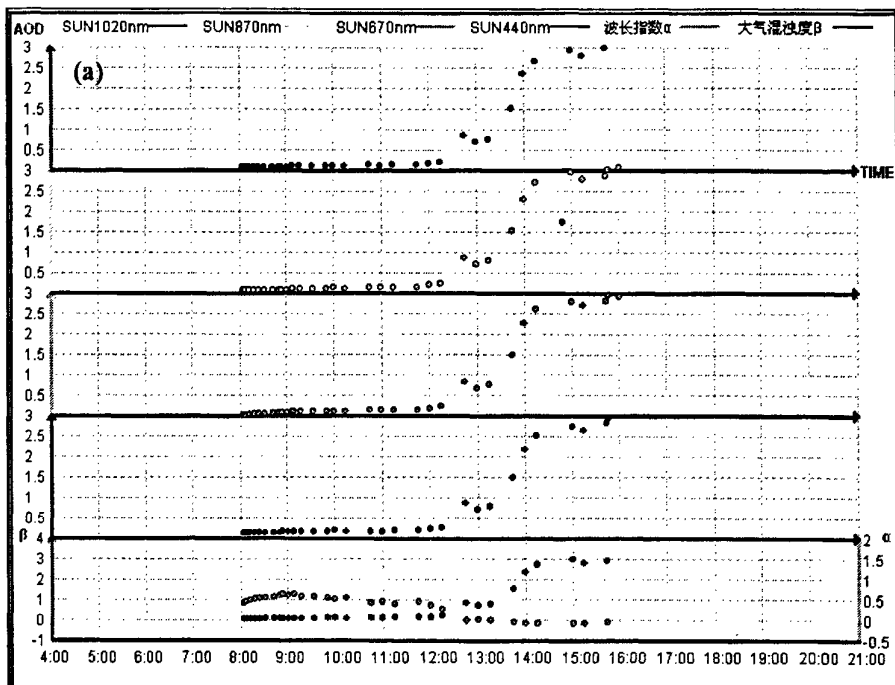
图2.5 我国北方地区晴天条件下RealTime运行结果

(2) 北方沙尘天气

无云干扰或云对观测资料干扰较小时，RealTime 软件能很好的监测沙尘气天气的发生发展。

如图 2.6(a)为锡林浩特地区 2006 年 2 月 19 日沙尘天气发生阶段的 AOD 时序图。各通道 AOD 值呈明显的递增趋势。各通道 AOD 峰值都超过 3。15:20 后仪器转为保护状态停止观测，传回的观测数据为无效值 0，但由以上资料已经可以实现沙尘天气的准确预警。图 2.6(b)为 2006 年 5 月 30 日沙尘天气逐渐减弱过程中软件的运行结果，清晰反映了各通道 AOD 值的递减趋势。870nm 通道 AOD 值不仅在本通道显示区域出现，在 1020nm 通道显示区域也有分布。670、440nm 通道 AOD 值的散点分布亦超出了本显示区域的范围。由于作为背景的阈值线在界面上等间距分布，可以正确读出 870、670、440nm AOD 峰值约为 4.5。

当云严重干扰太阳光度计观测时，由于采用云处理算法将导致大量观测数据流失，为了提高预警精度，需要结合其它资料。引入能见度仪资料是比较简单可靠的方法之一，本文第 4 章对此具体分析。如图 2.6(c)取自锡林浩特 2006 年 3 月 24 日沙尘多云天气。AOD 日变化曲线出现两个峰值，观测数据受云干扰。云光学厚度和 AOD 叠加导致反演结果偏大，单纯采用太阳光度计反演结果已难以确定沙尘天气发生时间。



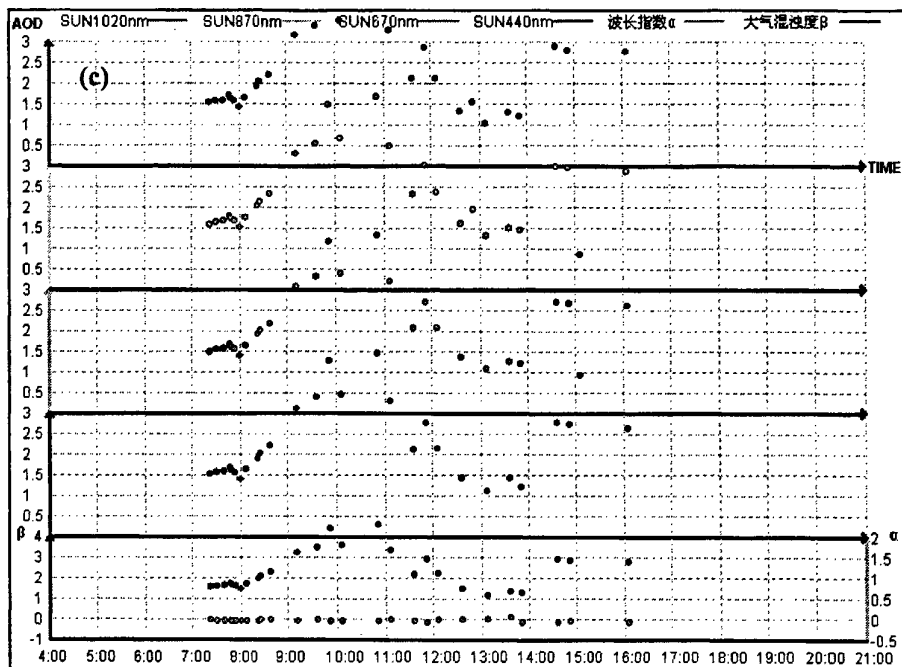


图2.6 我国北方地区沙尘天气条件下RealTime运行结果

(a)沙尘天气发生阶段(b)无云干扰(c)有云干扰

(3)南方多云天气

图2.7(a)取自南京地区07年9月12日有云天气。670nm通道AOD值不仅在本通道显示区域出现，同一时间段内在1020nm、870nm通道显示区域亦有分布，这些跨显示区域分布的散点，日变化呈单峰状。可以认为该日总云量垂直分布在12时-13时值最大，但全天空总云量分布未达到 10^{-} ，所以同一时间段内的观测数据只部分受到云干扰。440nm通道AOD值散点分布有类似特征。

这一类型图像只能在有限范围反映云的分布特征，当云量很大超过一定范围时，光度计观测数据往往无效，从而导致本系统亦无法反演计算出有效数据（如图2.4中10-12时数据）。

图2.7(b)取自南京地区07年9月6日晴天。对比图2.7(a)显然云的影响相对较小，适宜采用云处理算法。

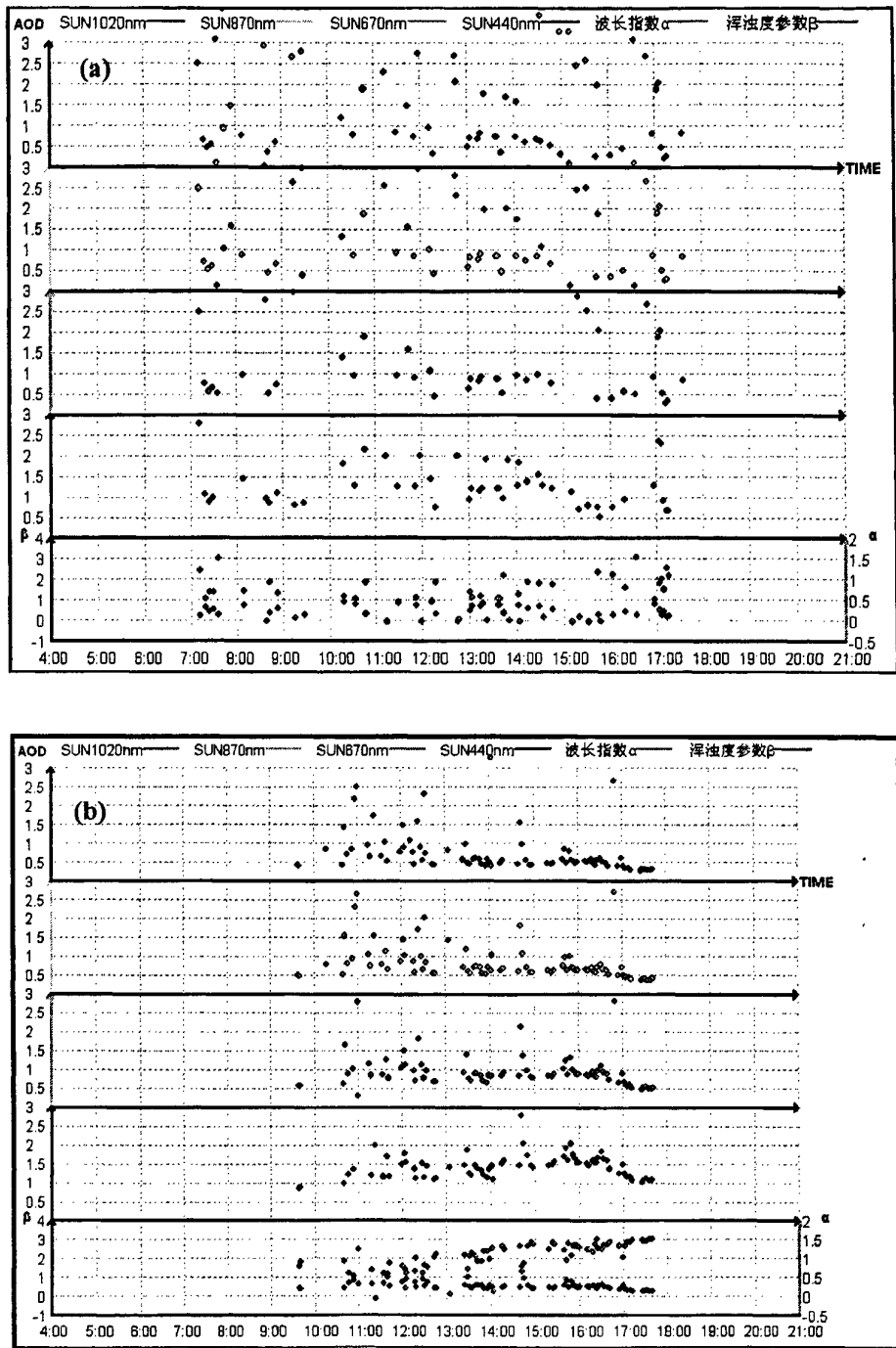


图2.7 南方多云天气RealTime运行结果

(a)一定程度上反映云分布特征(b)受云干扰数据较少,适宜云处理算法

第三章 云对我国北方气溶胶光学特性影响分析

在气溶胶地基观测中,云的辐射强迫与大气气溶胶辐射强迫叠加,是影响观测精度的主要原因之一。同时,云、气溶胶相互作用,使得定量分析气溶胶间接辐射强迫效应更加困难。

一些研究认为,源于气溶胶和特定云条件下的长短波辐射变化会导致云光学特性的改变;同时有研究指出某些条件下云的宏观动力过程对云光学特性的改变起主导作用^[59]。刘玉芝等^[60]利用一维辐射对流气候模式,详细研究了云量、云光学厚度以及云高等要素的变化对大气顶和地面太阳短波辐射和红外长波辐射通量以及云的辐射强迫的影响,给出了计算这些物理量的经验拟合公式。陈丽等^[61]采用二维分档云模式,分析扬沙和沙尘暴天气条件下矿物气溶胶对云微物理结构、光学特性以及降水形成的影响,认为当扬沙和沙尘暴天气增加大气中大核和巨核的浓度,促进云中水汽的活化,暖云和冷云降水量均大幅增加,但可忽略巨核增加对云光学厚度和反照率的作用;当矿物沙尘粒子同时作为有效的云凝结核和冰核参与云的发展时,冰核浓度增加使水成物有效半径减小,抑制了暖云和冷云降水,云内存留的大量冰晶增强云的光学厚度和反照率。Huang等^[62]对受沙尘影响和未受沙尘影响地区的云进行研究认为,干燥地区沙尘气溶胶参与云中的微物理过程可减小冰晶的有效半径,缩减卷云的冰水通道,降低云的光学厚度。王玉洁等^[63]利用MODIS卫星资料,讨论了我国北方地区2004年3月26~28日沙尘暴过程中沙尘气溶胶对云物理特性和辐射强迫的影响,初步结果表明,沙尘气溶胶明显改变了云的物理特性,使云滴变小,含水量及光学厚度减少,减弱了云的净辐射强迫,云的冷却效应受到了抑制,相当于大气层顶沙尘气溶胶的增温作用。

3.1 采用云处理算法提高定标系数精度

为保证反演精度,必须首先对太阳光度计进行准确定标,定标精度决定着气溶胶反演结果的精度。光度计定标方法主要包括:(1)Langley定标法,需要找到理想的定标天气条件^[64];(2)传递定标法,需要一台光度计作为基准光度计;(3)标准定标法,利用光度计测定一定光谱范围的标准灯的能量,快速但精度相对较低^[65]。

定标精度不够的太阳辐射计,其数据反演出的气溶胶光学参量之间存在着很大的差异。对于联网观测,太阳辐射计的定标可以保证反演结果之间的可比性,良好的气溶胶监测网

络需要高精度的定标技术作为支撑。王先华等^[66]与法国里尔科技大学合作,在分析太阳辐射计原理与相关定标技术要求的基础上,优选出黄山光明顶定标场地,根据2005-2006年观测资料,建立了积分球标准辐射源,以此构成的太阳辐射计辐射定标系统,在功能上可以满足太阳辐射计全面辐射定标的需求。

本节资料采用内蒙古锡林浩特地区2006年太阳光度计资料,仪器每年定标一次,分析认为其每年定标所获得的定标系数不能满足反演精度。太阳光度计仪器观测精度能达到0.01,而其滤光片衰减造成的定标系数值漂移超出了这一范围,这对反演结果,特别是晴天资料的反演结果造成较大误差。本节采用Langley法定标法获得背景大气条件下仪器定标系数,进而插值计算各月定标系数,获得了高质量反演结果。

Langley法定标测量期间大气稳定(即大气光学厚度为常量)才能保证测量值的对数与大气质量数间的线性关系,这是利用Langley法高精度定标的基本条件。若气溶胶含量较大,大气中主要衰减因素如气体散射、气溶胶散射、臭氧、二氧化氮吸收等应分别考虑,宜采用改进的Langley法定标法^[67]。在改进的Langley法中,衰减组分光学厚度需要利用标准模式计算,而实际模式与标准模式之间必然存在一定的偏差,从而引起定标结果上的误差。与普通Langley法比较表明,若所选场地的气溶胶影响较小,如大气条件符合背景大气,则可以采用普通Langley法进行定标,从而克服改进的Langley法需要模式所可能带来的误差。

锡林浩特国家气候观测站所在的内蒙古锡林郭勒盟,是我国四大草原之一的内蒙古草原的主要天然草场,地形以高平原为主,按气候区划分区标准,属中温带干旱、半干旱大陆性气候^[68]。认为本站点可以选取到符合背景大气条件的资料进行太阳直射通道定标,并采用Langley法定标。

3.1.1 定标系数对反演精度影响分析

反演结果的精度强烈依赖定标系数。CIMEL 太阳光度计滤光片年衰减率达到20%-30%。本文分析得锡林浩特观象台 CIMEL 光度计因滤光片衰减而导致的定标系数年变化率超过20%(如表3.1)。分别计算定标系数偏小20%、正确、偏大20%时,锡林浩特地区9月16日AOD日变化曲线,如图3.1(a)、(b)、(c)。定标系数偏小时AOD日变化曲线下凹,定标系数偏大时AOD日变化曲线上凸,无法正确判断峰值和谷值。对于晴天数据,将使各通道AOD峰值产生12.5%-300%的偏差。

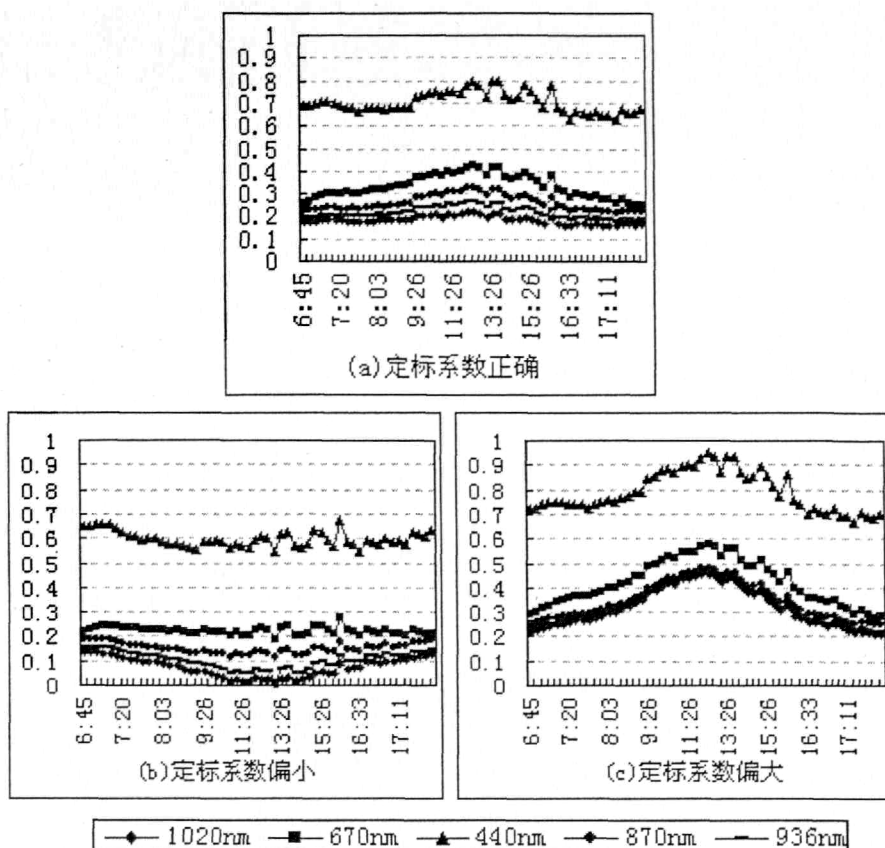


图 3.1 定标系数对反演结果的影响

3.1.2 云干扰对滤光片年衰减率影响分析

表3-1 Langley定标法分析CE-318-2太阳光度计滤光片衰减率及结果比较

通道	1020nm	670nm	440nm	870nm
	采用云处理方案前 / 采用云处理方案后			
06/01/2006	9135.004 /	19596.14 /	12752.79 /	19832.53 /
定标系数	9507.809	20435.33	13288.12	20662.53
08/01/2007	7469.144 /	15965.52 /	10104.47 /	16229.63 /
定标系数	7481.037	15990.3	10103.34	16238.04
年衰减率	18.24% /	18.53% /	20.77% /	18.17% /
	21.32%	21.75%	23.97%	21.41%

太阳光度计滤光片在使用中会发生衰减，且这种衰减是非线性的，其衰减率与仪器使用时间的也有关系。

表3-1为光度计2006-2007年因滤光片衰减而造成的定标系数减小，衰减率为18%-21%。采用云处理方案提高数据质量后，认为四通道滤光片实际衰减率为21%-24%。

3.1.3 插值计算各月定标系数

提取当地1-12月晴天数据，各月取AOD日平均值最小且日变化较小的一天，做Langley定标，定标时采用云处理算法，得定标系数年变化曲线如图3.2。

如图3.2(a)，4月强烈受沙尘气溶胶干扰，6月强烈受云干扰，未取得有效的晴天观测数据。5月仍一定程度上受沙尘气溶胶干扰，不适合作为背景大气。7-9月晴天大气受云和水汽干扰依然较明显，反演结果往往偏大，获得的定标系数偏小，也不适合作为背景大气。

图3.2(b)为使用不受沙尘、云干扰的晴天资料获得的定标系数年变化曲线。各通道线性拟合相关系数达到95%以上，符合计算要求的精度。受沙尘和云影响严重的4-9月的定标系数在此基础上插值计算得到。由图知，该方法减小了因滤光片衰减而造成的定标系数误差，同时避开了云、沙尘等干扰因素的影响，大大提高了定标系数和反演结果的精度。

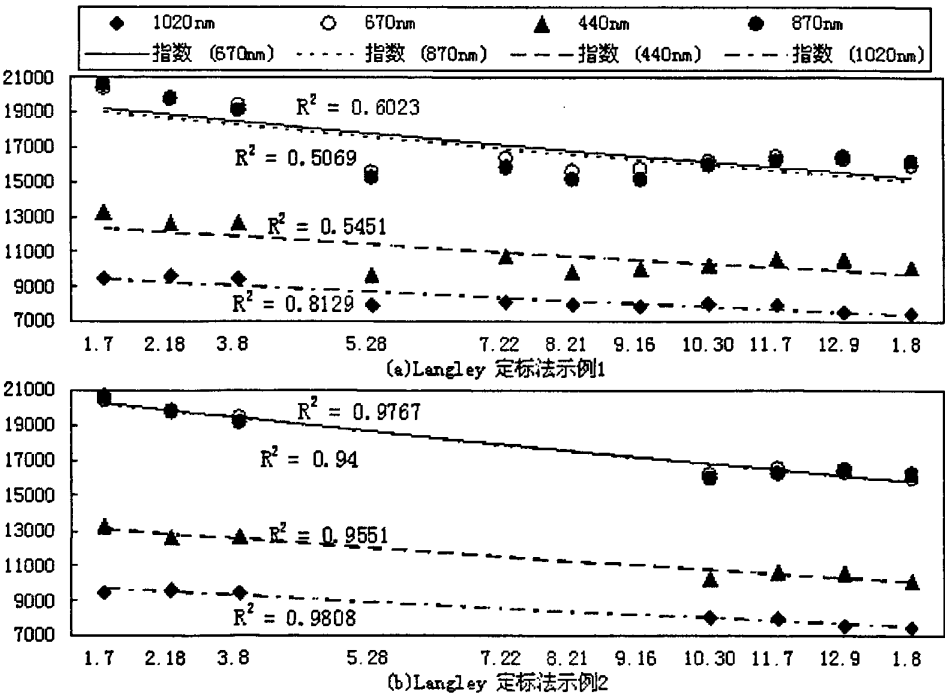
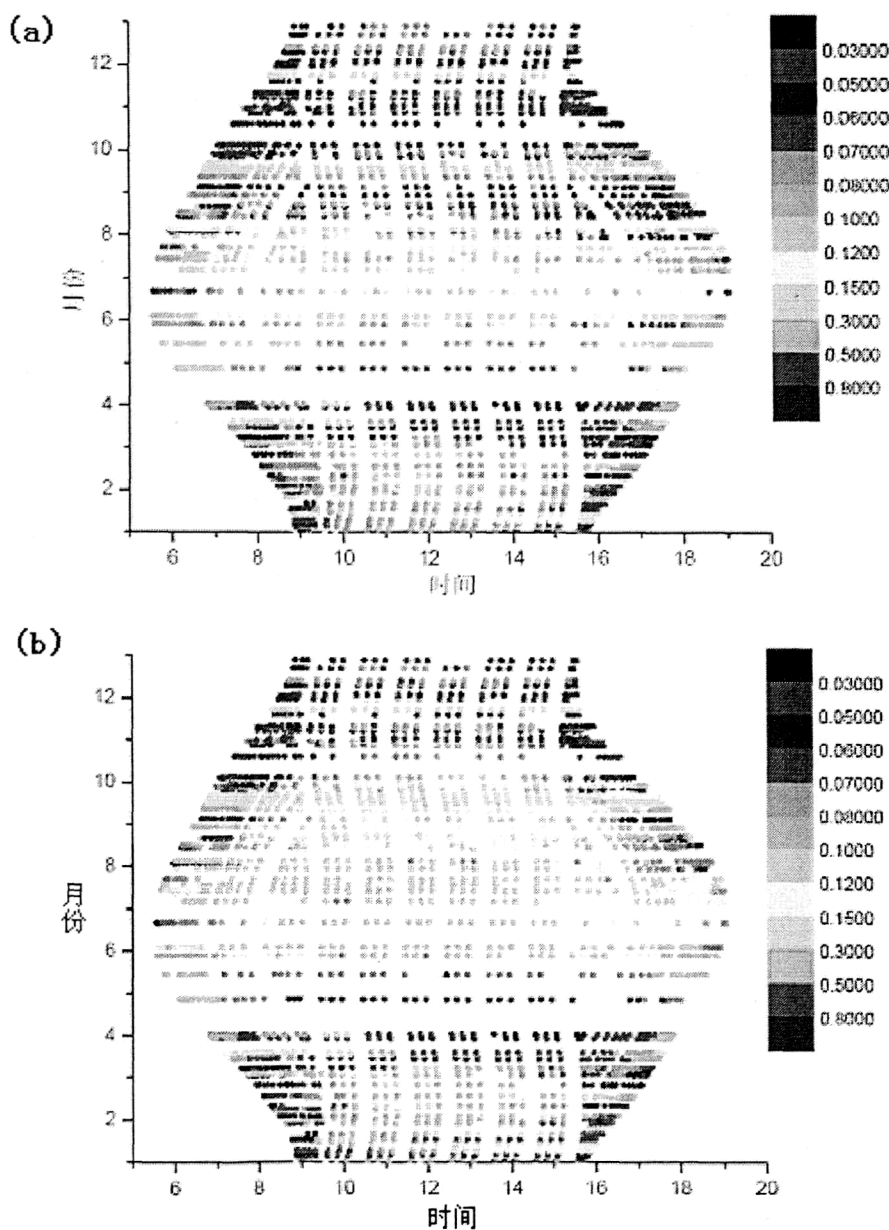


图3.2 定标系数变化趋势图

3.2 北方半干旱地区典型天气条件下 AOD 统计特点

由上节获得较高精度的各月定标系数后,本文对多种天气条件下气溶胶光学厚度的变化特点进行分析。

3.2.1 晴天天气



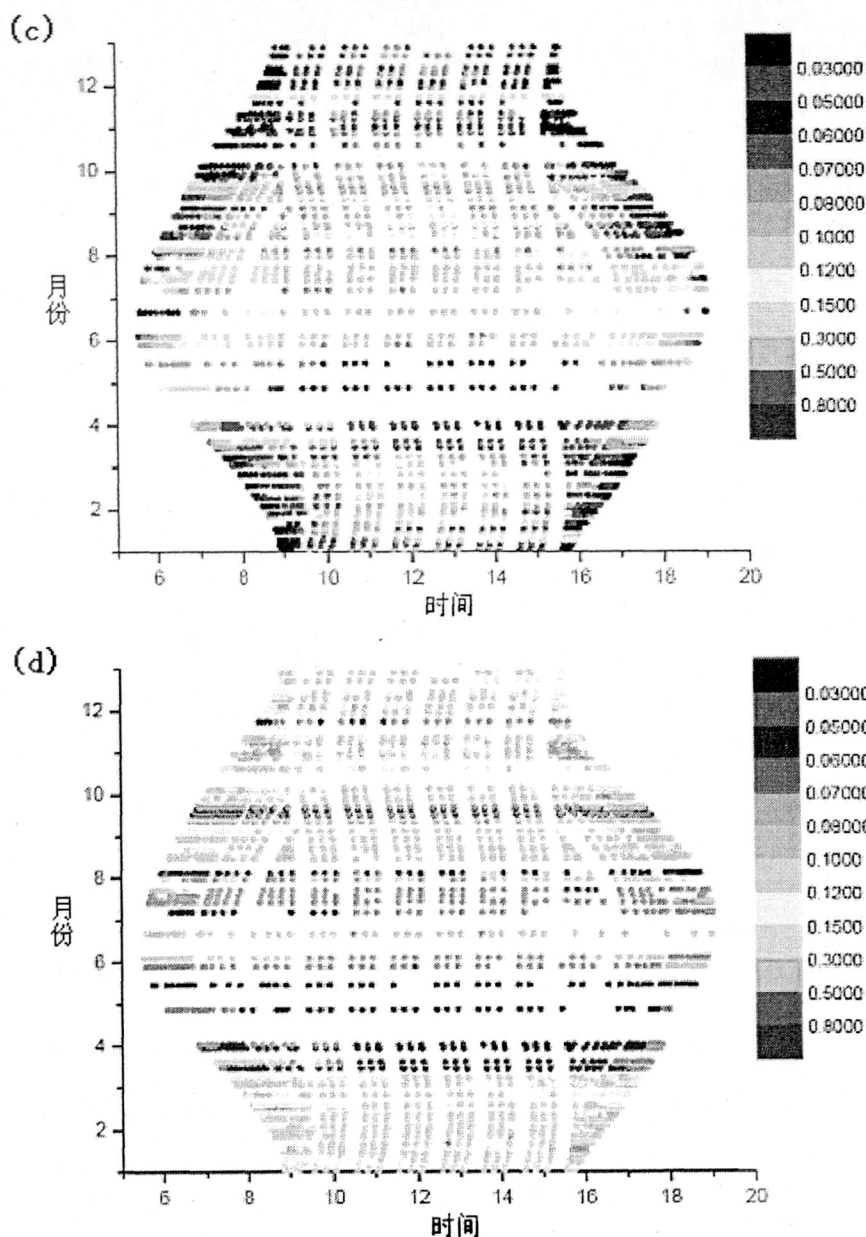


图 3.3 晴天 AOD 日变化, 采用云处理方案提高反演精度
(a)1020nm 通道(b)87nm 通道(c)670nm 通道(d)440nm 通道

提取锡林浩特地区 2006 年全部晴天资料, 滤除沙尘天气(参考台站历史资料)和多云天天气(参考地面气象站资料, 并采用云处理方案^[14]), 得到该地晴天大气 AOD 日变化的全年统计结果, 如图 3.3, 纵坐标表示月份, 横坐标为时刻。分析得到以下一些主要特征:

(1)锡林浩特晴天条件下, 整层大气气溶胶光学厚度日变化曲线呈单峰状。表现出早晨

和傍晚数值较小的特点。

(2)3-5月晴天条件下AOD明显较大,这主要是受春季沙尘天气频频发生的影响。由图4,当地晴天大气气溶胶光学厚度小于1.1,而大于0.8的数值都出现在3-5月。

(3)该地晴天条件下,红外波段通道(1020、870nm)反演得AOD最大值出现在3月,超过0.8;最小值出现在10-11月,小于0.06,可作为背景大气用于太阳光度计的定标;大气AOD日变化峰值整体表现出从春季向冬季递减的规律。可见光波段(670, 440nm)在3月和9月都出现了明显的峰值,数值分别超过0.8和0.5。

(4)锡林浩特地区夏季多云天气较多,受云干扰而导致有效数据缺失的情况较严重。如果不能通过其它途径获得云的定量分析结果,则将无法区分沙尘气溶胶和云的辐射强迫作用,造成太阳光度计反演结果失真甚至无效。这一现象在中国南方地区更加明显。

3.2.2 沙尘天气

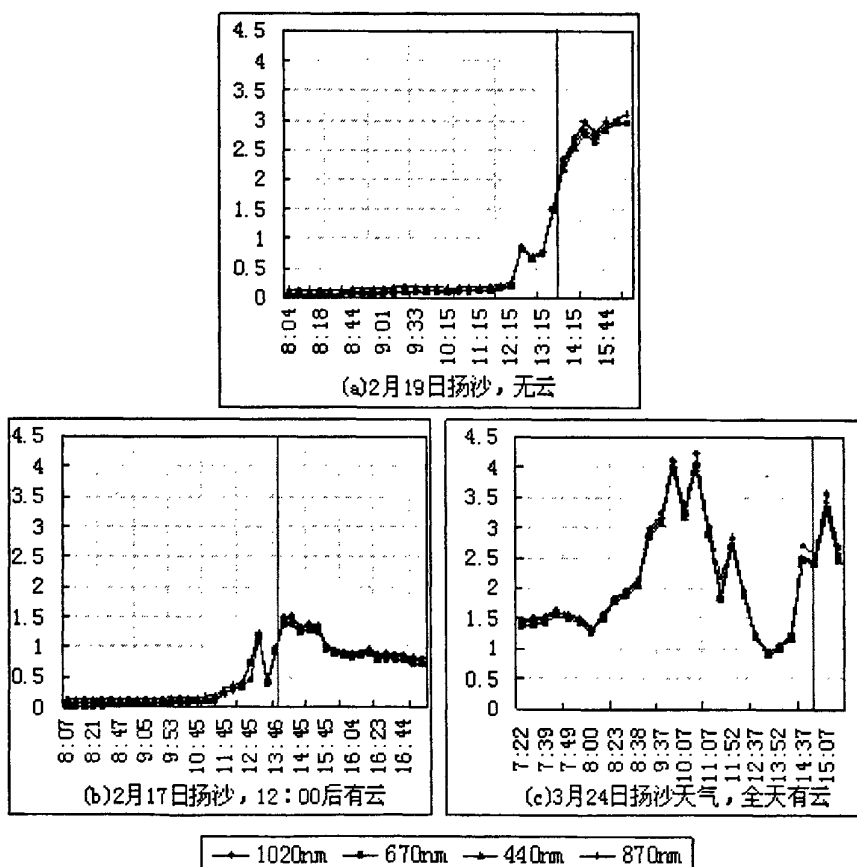


图 3.4 沙尘天气 AOD 日变化 (红色线为气象台发布沙尘警报的时间)

表3-2为观测站历史资料中记录的沙尘天气发生时间。图3.4为不同沙尘天气反演得AOD日变化曲线，图中用红线标注表3-2中记录的时间。

表3-2 观测台记录的沙尘天气发生时间

日期	出现沙尘天气的时间
19/02/2006(无云)	扬沙(13:39-20:00)
17/02/2006	扬沙(13:51-16:30)
24/03/2006	扬沙(14:50-20:00)

(1)无云干扰时，曲线平滑，呈明显单峰状，当AOD到达一定值时可预警，如图4(a)。锡林浩特地区，气溶胶光学厚度(AOD)达到1.5可发布扬沙天气警报。

(2)有云干扰时，曲线不平滑，呈双峰或多峰状，有明显波谷，仅从数值增大不能判断沙尘天气的发生，如图4(b)、(c)。

(3)当大面积发展旺盛的积云对沙尘气溶胶光学厚度产生干扰时，云处理方案难以获得可靠的结果，云的光学厚度与气溶胶光学厚度叠加，导致反演结果偏大，难以判断沙尘天气发生时间，如图4(c)。

(4)有云干扰时，在沙尘天气发生阶段，AOD值出现一次明显的波动，往往出现一个低值，如图4(b)(c)。原因可能有二：一是云量分布随大气运动而变化；二是输送到本地的沙尘气溶胶与云相互作用。进一步分析见3.4节。

(5) 图4(b)(c)中，AOD值在出现波谷之后迅速跃变达到峰值，此时沙尘气溶胶大量输送而至，对光学厚度的增大起主要作用。

3.3 卫星云图对比分析

为了进一步分析云对沙尘天气发生过程产生的影响及云、气溶胶相互作用的情况，本文结合卫星资料作对比说明。

Rosenfeld和Lensky运用卫星反演云微物理特征，由云顶粒子有效半径与云顶温度的配置关系分析对流云微物理特征^[69]。本节基于这一卫星微物理反演分析方法，采用中国卫星遥感数据服务网下载的NOAA-16、18极轨卫星资料，分析云对沙尘天气发生阶段的影响。图3.5为RGB图像，红、绿、蓝三基色分别采用第1通道(可见光波段)反射率值、第3通道(中红外波段)反射率值、第4通道(远红外波段)亮温来赋值。可见光反射率越大色调越红；第

3通道反射率越大,即云顶粒子有效半径越小,色调越绿;第4通道亮温越高色调越蓝。图中白色圈表示锡林浩特观测站位置。

(1)图3.5(a)(b)中,沙尘显示黄绿色,地面积雪显示紫色。19日浑善达克沙地显示为接近白色的区域,可见卫星反演结果受到下垫面辐射的干扰,需要地面资料作对比订正。

(2)由图3.5(b),观测点处于沙尘移动路径边缘,光度计测得AOD值相对较小,峰值仅为1.5。观测点所在区域及其西北方向有云发展,呈浅黄色,有阴影,即云顶温度较高、有效半径较小,认为是对流单体。其对太阳光度计资料的观测产生干扰,使日变化曲线出现波动。

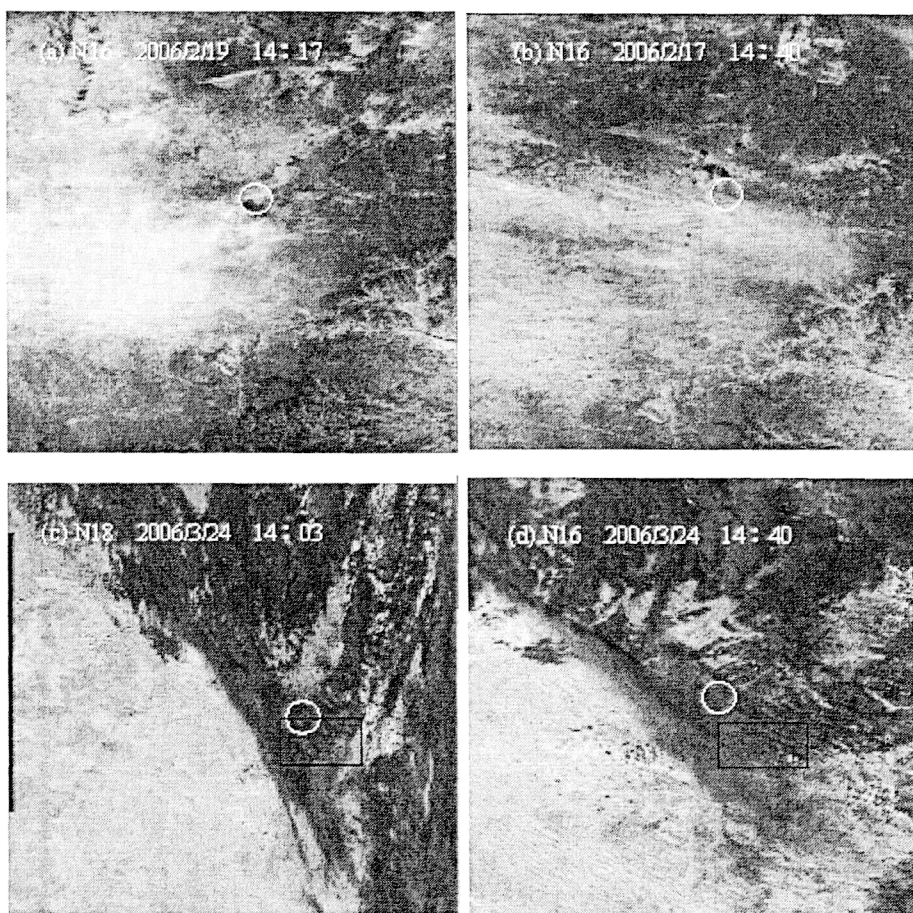


图3.5 沙尘天气卫星云图(北京时)

(3)由图3.5(c)(d)中,云体呈红色,即可见光反射率较大,云顶粒子有效半径较大,云顶温度较低,为积云。云体随沙尘气溶胶传输路径移动,经过锡林浩特地区,是导致到地面光度计反演结果出现波动的主要原因。

(4)由图3.4(c)得知14:00-15:00气溶胶光学厚度迅速增加,为沙尘发展阶段。图3.5(c)、

(d)取自14: 03和14: 40卫星资料。对所示黑色框中云体, 计算云粒子有效半径, 结果如表3-3。积云中云粒子有效半径减小, 谱宽变窄。认为沙尘气溶胶输送而至, 对积云的发展产生了影响, 改变了云的光学特性。云的光学厚度增加, 与沙尘气溶胶光学厚度叠加, 使反演结果急速增大, 时序图曲线发生跃变。

表3-3 选中区域中云粒子有效半径 r_e 变化

时间(北京时)	14: 03	14: 40
r_e 最大值(μm)	34.2	28.4
r_e 平均值(μm)	32.86754	26.07304
r_e 最小值(μm)	21.1	18.5

沙尘天气过程, 云的宏观动力过程与气溶胶第一间接效应共同产生作用, 增加了计算云体光学厚度的复杂性, 当地面观测资料不能将气溶胶与云的辐射强迫区分时, 引起光度计反演结果日变化曲线的波动甚至无效。

3.4 小结

本文采用锡林浩特地区CE318太阳光度计资料, 借鉴AERONET采用的云处理方案^[14], 分析了云对仪器Langley法定标精度及气溶胶光学厚度反演结果的影响, 得到以下几点结论:

1. 太阳光度计滤光片年衰减率可达20%以上, 制约着定标系数, 进而影响反演结果准确度。本文基于内蒙古锡林浩特地区气候特点, 引入插值法提高定标精度。通过提取符合背景大气条件的晴天数据Langley定标, 获得滤光片衰减导致的定标系数年变化曲线, 进而插值计算各月定标系数, 提高反演结果精度。

2. 通过统计锡林浩特地区晴天资料并进行云处理后, 发现该地区整层大气AOD日变化主要表现出早晚小, 中午高的特点。红外波段通道大气气溶胶光学厚度日变化峰值整体表现出从春季向冬季递减的规律, 可见光波段在3月和9月都出现了明显的峰值, 数值分别超过0.8和0.5。夏季受云的干扰, 有效数据缺失较严重。

3. 沙尘天气条件下, 若无云干扰, 当气溶胶光学厚度(AOD)超过1发布沙尘天气警报。若有云干扰, 云的光学厚度与AOD叠加, 云的发生发展引起光度计反演结果日变化曲线出现多峰值情况。其中, 云随沙尘气溶胶传输路径移动发展, 即云的宏观动力过程, 是干扰太阳光度计反演结果的主要原因。

自动太阳光度计 Langley 定标及观测结果易受云影响。中国北方地区少云天气条件下,云干扰可以通过相关算法剔除。但在多云天气条件下,采用云处理算法将剔除大量数据,造成有效观测数据的流失。若能通过其它途径获得云光学厚度信息,则将较好的提高光度计观测资料的利用率。

第四章 沙尘气溶胶光学特性及预警阈值分析

4.1 气溶胶光学特性与能见度相关性分析

李霞等^[41]初步提出了依据气溶胶光学厚度判断沙尘天气强度的标准。同时指出气溶胶光学厚度与水平能见度之比值能够较全面地考虑水平和垂直两个方向的要素变化,衡量沙尘天气强度更具有合理意义。沈建国等^[42]研究指出在沙尘天气发生过程中,气溶胶光学厚度是一个相当敏感的变量,可以很好的反映沙尘输送过程,对于大气气溶胶光学厚度的监测可以为沙尘天气的预报提供较为准确的客观依据。韩晶晶等^[70]研究指出内蒙古、南疆盆地、青海等地区沙尘天气过程与AOT 值同步变化;在沙尘天气的多发区气溶胶光学厚度与沙尘天气有较好的相关性。同时邱玉琨等^[71]研究指出异常低能见度事件(日能见度距平 $< -2\sigma$, σ 为各站各日能见度距平的标准差)频次与能见度方差之间存在显著的正相关性,风速距平频次增加,使得沙尘天气发生频次增加,从而导致低能见度事件频次上升。徐晓峰等^[72]对北京地区一次强沙尘天气过程分析指出,沙尘天气来临前后,许多气象要素(如风速、能见度、温度、湿度等)发生急剧变化。赵秀娟等^[73]利用光度计资料计算兰州冬季大气气溶胶的光学厚度,并与能见度进行了分析拟合,指出光学厚度与能见度之间近似呈指数递减的关系。

本节分析了锡林浩特地区扬沙无云天气条件下,大气气溶胶光学厚度、大气浑浊度、波长指数与地面能见度之间的相关性。太阳光度计测量整层大气气溶胶光学厚度,能见度仪观测水平能见度,同时分析水平和垂直两个方向的要素变化,对衡量沙尘天气强度更具有合理意义^[41]。在太阳光度计启动自动跟踪观测功能的情况下,若遇到强沙尘暴天气,仪器会自动启动自动保护功能而停止观测,此时传回的观测资料数值皆为0,但在沙尘天气发生阶段,大气浑浊度较小,此时仪器正常工作,依然可以获得监测预警的实时资料。

能见度为划分沙尘天气的主要依据,反映不同沙尘天气条件下的大气含尘量及气溶胶光学厚度不同的物理本质^[74]。本节采用锡林浩特地区2006年能见度仪资料。该仪器为华云技术开发公司的FD12能见度仪,是一个微处理器控制的前散射测量仪器。它发射红外光的脉冲,并监测空中粒子散射的光。测量接收脉冲的强度,并转化为气象能见度(MOR),这是基于Vaisala的MITRAS的大气透射仪的广泛校准。FD12能见度仪保存的资料包括三部分:1分钟平均能见度(单位m)、10分钟平均能见度(单位m),仪器采样时间间隔为5分钟。

4.1.1 无云沙尘天气

本节首先选取锡林浩特地区2006年2月19日扬沙天气的发生过程,分析了大气气溶胶光学厚度、大气浑浊度、波长指数与水平能见度的相关性。

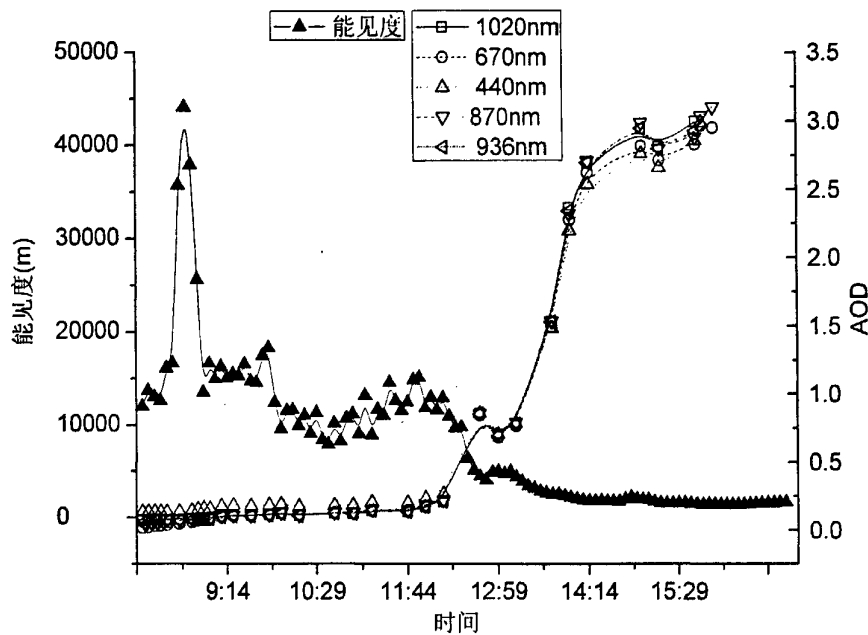
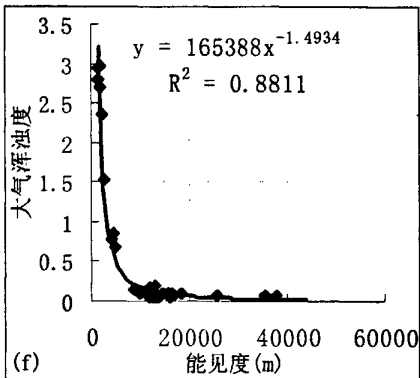
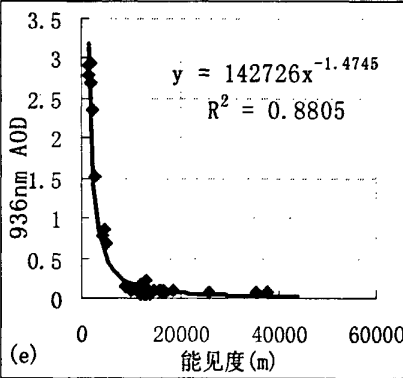
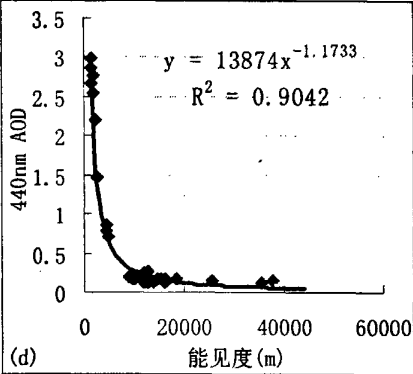
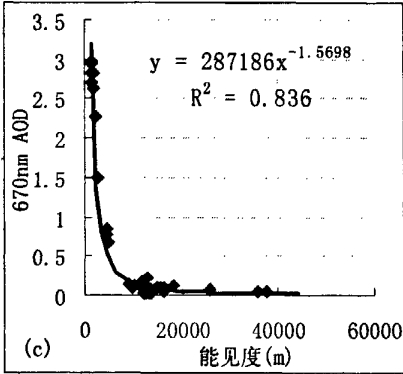
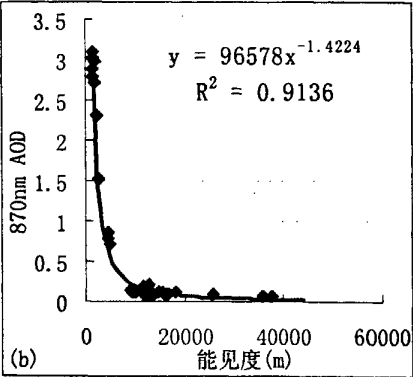
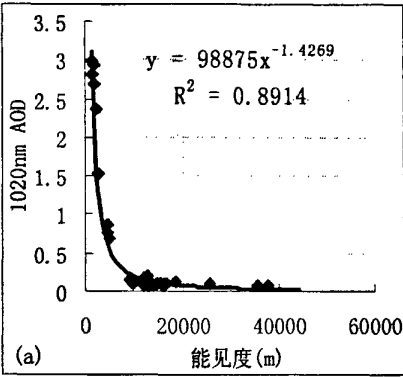


图4.1 锡林浩特2006年2月19日能见度、AOD日变化

由图4.2易知,无云天气条件下,沙尘天气发生阶段,水平能见度与垂直方向大气气溶胶光学厚度有良好的相关性。AOD、大气浑浊度与能见度呈乘幂关系,波长指数与能见度呈对数关系。无云干扰时,相关性达80%以上。获得相关性拟合公式如表4-1。

表4-1 无云沙尘天气大气气溶胶光学特性与能见度相关性拟合公式

能见度(x)	相关性拟合	回归系数
1020nm	$y = 98875x^{-1.4269}$	$R^2 = 0.8914$
870nm	$y = 96578x^{-1.4224}$	$R^2 = 0.9136$
AOD(y)	$y = 287186x^{-1.5698}$	$R^2 = 0.836$
	$y = 13874x^{-1.1733}$	$R^2 = 0.9042$
	$y = 142726x^{-1.4745}$	$R^2 = 0.8805$
大气浑浊度(y)	$y = 165388x^{-1.4934}$	$R^2 = 0.8811$
波长指数(y)	$y = 0.2849\ln(x) - 2.2279$	$R^2 = 0.8472$



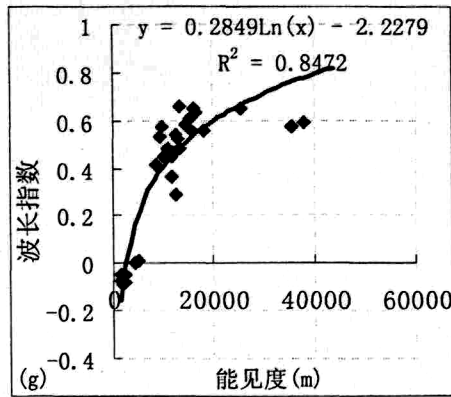


图4.2 2006年2月19日无云扬沙天气各通道AOD、大气浑浊度、波长指数与能见度相关性分析

4.1.2 多云沙尘天气

选取锡林浩特2006年3月24日多云扬沙天气能见度仪资料，由表4-1拟合公式，分析气溶胶光学特性结果如图4.3。

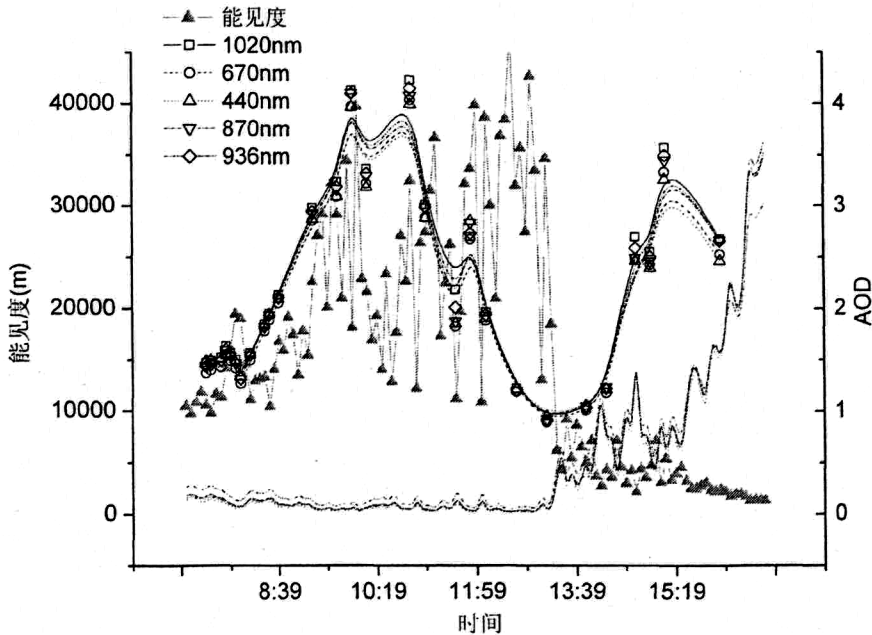


图4.3 多云扬沙天气条件下能见度与光学厚度日变化

值得注意的是，表4-1只适合于锡林浩特地区扬沙等沙尘天气的监测预警，即只有在这一类异常低能见度事件的情况下，分析大气水平和垂直两个方向要素的相关性才有意义。如图4.2(g)，此时波长指数最小值为-0.09，气溶胶平均半径较大，为典型沙尘气溶胶。

图4.3为能见度仪资料和太阳光度计反演结果日变化图，红色线为由能见度仪资料根据

表4.1拟合得到的气溶胶光学厚度。由图易知，太阳光度计资料反演垂直方向上大气气溶胶光学厚度，反演结果严重受云干扰，若采用云处理算法将导致大量观测数据流失。而能见度反映水平方向上大气状况，不受云干扰，结合两者，能更好地了解沙尘天气发生过程，提高沙尘天气预警精度。对比光度计反演结果（黑色线）和能见度仪拟合结果（红色线）发现：

(1)由能见度仪资料分析AOD进而监测沙尘天气，峰值出现在16: 59；由太阳光度计实测资料反演AOD来监测沙尘天气，峰值出现在16: 09，两者相差约50分钟，说明沙尘天气条件下(异常低能见度事件)，大气水平和垂直两个方向上的要素对事件的响应程度不同。对扬尘天气而言，垂直大气气溶胶光学厚度及由此计算的大气浑浊度、波长指数等，对事件的响应更灵敏。

(2)能见度仪资料不受云干扰，其拟合结果不受云光学厚度的影响，可以获得比较稳定的沙尘天气预警阈值，结合图3.3，这里取AOD预警阈值为1，则相应拟合结果对应时刻为14: 04，此时能见度从3717m骤降至2762m。同一时刻，太阳光度计反演得AOD为增加的趋势，数值亦超过1。结合两者确定沙尘天气的发生时间为14: 04，比该观测站历史资料记录中的14: 39，提前了约30分钟。

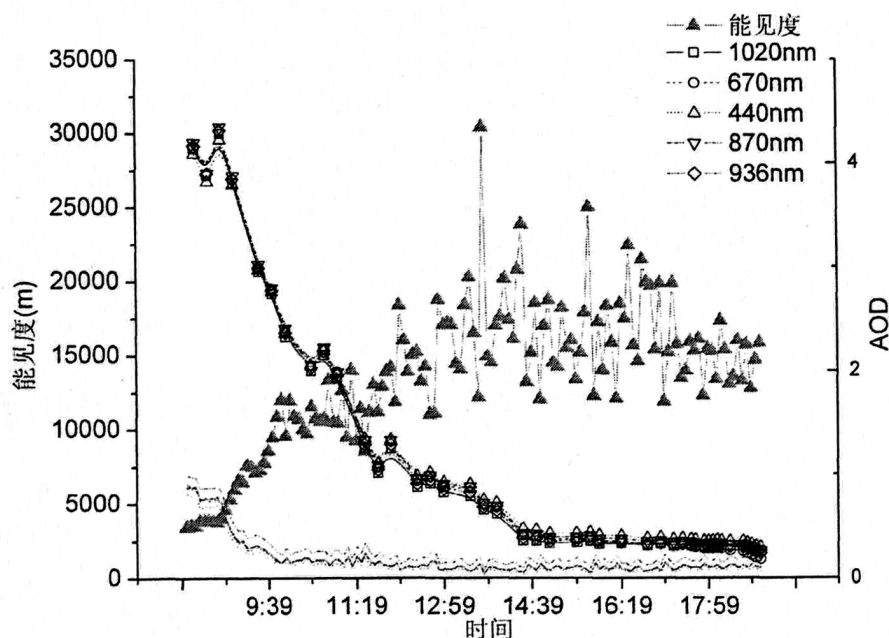


图4.4 多云浮尘天气条件下能见度与光学厚度日变化

再次选取锡林浩特2006年5月30太阳光度计资料，分析结果如图4.4。根据能见度仪资

料, 6: 54~7: 44能见度小于3km, 最小值1.619km, 记录为浮尘天气。当日00: 00~14: 00, 全天空总云量都记录为10⁻, 因此云光学厚度与AOD叠加, 光度计反演结果偏大, 而采用云处理算法可能导致14: 00之前的观测数据全部无效。采用表4.1相关性拟合公式, 由能见度资料拟合得到AOD日变化曲线如图4.4红色线所示。由于缺乏无云、浮尘天气的资料进行检验, 直接采用表4.1分析浮尘天气资料具有一定误差, 但结合图4.4认为误差在合理范围内。

初步研究认为, 由表4.1中关系式分析锡林浩特地区沙尘天气条件下水平能见度与垂直大气气溶胶光学特性的相关性具有合理性, 同时结合两者可以提高对沙尘天气的预警精度, 并获得比较稳定的预警阈值, 本文依据锡林浩特地区资料, 取当地沙尘天气AOD预警阈值为1。当光度计反演结果和能见度拟合结果同时剧增, 数值超过1时, 往往伴随着沙尘天气的发生; 二者同时骤减, 其中能见度拟合得到的AOD数值小于1时, 往往伴随着沙尘天气的减弱结束。表4.1拟合公式未考虑其它因子(如相对湿度)对能见度的影响, 存在一定的误差, 但这对监测沙尘天气的发生发展影响较小, 认为结果依然是合理的。

需要注意的是, 表4.1关系式只适用于锡林浩特地区沙尘天气条件, 本地区其他天气条件下, 如晴天、轻度污染大气(如人为气溶胶造成的灰霾天气)情况下, 水平能见度与垂直大气气溶胶光学特性无必然相关性。

4.2 气溶胶粒子谱分析

4.2.1 粒子谱反演原理

King等^[75-79]提出, 通过测量透过大气层的太阳直接辐射通量密度, 可以获得大气气溶胶粒子的光学厚度值, 这些光学厚度值可以用来研究大气气溶胶的光学特性和反演其粒度谱分布。在球形粒子的假设下, 且由于气溶胶粒子的复折射率 n 在可见光和近红外波段随波长的变化较小, 可取为常数, 则气溶胶光学厚度 τ_i 和其粒子谱分布的积分方程可表示为:

$$\tau_i = \int_0^M \int_0^M \pi r^2 n(r, z) Q_e(r, \lambda_i, m) dr dz \quad (4-1)$$

其中 Q_e 为气溶胶消光效率因子, r 为粒子半径, r_0 、 r_M 为半径的上限和下限, $n(r, z)$ 为局地气溶胶谱分布, $n(r, z)dr$ 为高度 z 处, 半径在 $r+dr$ 之间的气溶胶粒子数密度。

$$\text{令 } N(r) = \int_0^M n(r, z) dz \quad (4-2)$$

取 Z_m 为大气顶高度, $N(r)$ 即为待求的整层大气柱气溶胶粒度谱分布。

$$\text{令 } K_i(r, \lambda_i, m) = \pi r^2 Q_e(r, \lambda_i, m) \quad (4-3)$$

式(4-1)形式转化为:

$$\tau_i = \int_0^M K_i(r, \lambda_i, m) N(r) dr \quad (4-4)$$

式(4-4)是目前常用的气溶胶粒度谱遥感方程, 即第一类Fredholm积分方程, 求解该方程能从太阳直接辐射谱信息物理特征量的测量中反演出大气柱气溶胶粒子谱分布, 该方法称为消光法。

将 $N(r)$ 分为慢变函数 $f(r)$ 和快变函数 $h(r)$ ^[80], 即:

$$N(r) = f(r)h(r) \quad (4-5)$$

式(4-4)转化为:

$$\tau_i = \int_0^M K_i(r, \lambda_i, m) f(r) h(r) dr \quad (4-6)$$

将式(4-6)转化为矩阵方程:

$$\tau = Af + \varepsilon \quad (4-7)$$

f 为待求解向量, ε 为误差向量, A 为系数矩阵, 其元素为:

$$A_{ij} = \int_j^{j+1} K_i(r, m) h_j(r) dr \quad (4-8)$$

$i = 1, 2, \dots, N$ (波长通道数) $j = 1, 2, \dots, M$ (粒度区间数)

为了得到合理的光滑结果, Phillips^[81]提出了要求第二类积分表达式为最小, 即要求

$\sum (f_{i-1} - 2f_i + f_{i+1})^2$ 为最小。从该条件出发, 求出需要的光滑矩阵 H :

$$H = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 5 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ & & & & 0 & 1 & -4 & 5 & -2 \\ & & & & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

结合Phillips-Twomey约束线性反演方程, 得到式(4-7)的解为:

$$\bar{f} = (A^T A + \gamma H)^{-1} A^T \bar{\tau} \quad (4-9)$$

其中, $\vec{f}, \vec{\tau}$ 为列向量; A, A^T 为系数矩阵及其转置矩阵; γ 为Lagrange算子(光滑因子)。
式(4-9)采取如下的迭代求解过程:

$$\vec{f}^{(n+1)} = (A^{(n)T} A^{(n)} + \gamma^{(n)} H)^{-1} A^{(n)T} \vec{\tau} \quad (4-10)$$

$$A_{ij}^{(n)} = \int_{r_j}^{r_{j+1}} K_i(r, m) h^{(n)}(r) dr \quad (4-11)$$

其中, $h^{(n)} = h^{(n-1)}(r) f^{(n)}(r)$

$$\gamma^{(n)} = b \sum (A^{(n)T} A^{(n)})_{ii} / N \quad (4-12)$$

其中, $f_j = f(\bar{r}_j)$, $\bar{r}_j$ 为选定子区间的中点。

收敛判据:

$$(\sum_i (f_i^{(n)} - 1)^2 / M)^{1/2} < \delta \quad (4-13)$$

慢变函数 $f^{(n)}(r)$ 由 n 阶解向量线性插值求得, 最后求得的稳定解, 快变函数 $h_j^{(n)}(r)$ 就是待求的气溶胶粒度分布谱 $N(r)$ 。

4.2.2 典型天气条件下粒度谱

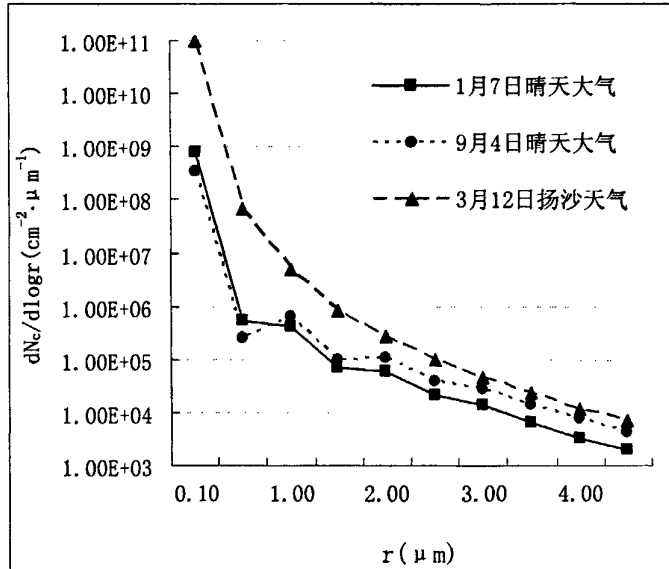


图 4.5 不同天气条件下粒子谱分布

在气溶胶粒子谱分布反演的过程中对参数的确定需要进行说明。特别是粒径区间的选取。King 等^[75]、Yamamoto等^[82]的研究结果表明在粒子半径 $0.1\sim 5.0\mu\text{m}$ 内反演结果的精度很高,而超出这个范围就会产生误差,辛金元等^[83]对腾格里沙漠2001年4~9月份的整层大气气溶胶的光学遥感观测结果分析表明,由于消光因子对大粒径粒子消光效应的不敏感性,决定了消光法仅可较好地反演粒径在 $0.1\sim 5\mu\text{m}$ 之间的气溶胶谱分布特征。

本节选取锡林浩特地区冬季晴天大气(1月7日)、秋季晴天大气(9月4日)、扬沙天气(3月12日)条件下资料,分析不同天气条件下粒度谱特征。程序计算中取粒度区间数 M 为10,分别为 $0.1-0.5$, $0.5-1.0$, $1.0-1.5$, $1.5-2.0$, $2.0-2.5$, $2.5-3.0$, $3.0-3.5$, $3.5-4.0$, $4.0-4.5$, $4.5-5.0\mu\text{m}$ 。结果如图4.5所示。

由图4.5易知,锡林浩特地区气溶胶粒度谱分布基本符合Junge谱,扬沙天气的谱分布同晴天大气的谱分布有着很大的差异,扬沙天气下气溶胶浓度有明显的增加,粒径在 $0.1\sim 1.0\mu\text{m}$ 的大粒子比干洁天气下的浓度高两个量级。在晴天大气下,锡林浩特地区气溶胶谱形大致为Junge谱,在粒度 $1.0\sim 1.5\mu\text{m}$ 、 $2.0\sim 2.5\mu\text{m}$ 范围内各出现一个峰值。

在该粒度谱区间,消光法仅可较好地反映晴天大气条件下气溶胶粒度谱分布特征,而对沙尘天气气溶胶实际粒度谱分布特征的响应是不够敏感的,不能很好的计算出沙尘天气的粒度谱分布特征,需要进一步分析。

4.2.3 粒度谱随时间演变特征

辛金元等^[83]对腾格里沙漠光学遥感观测结果分析指出消光法对 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 的大粒子谱分布的反演结果更为稳定,而初始函数选取Junge分布比较能反映 $0.1\sim 1.0\mu\text{m}$ 的谱分布特征。

本节对该粒度区间细分,尽可能使对此粒度区间的反演谱更接近于真实谱分布形式。粒度区间数 M 取8,具体为 $0.1-0.2$, $0.2-0.3$, $0.3-0.4$, $0.4-0.6$, $0.6-0.8$, $0.8-1.0$, $1.0-2.0$, $2.0-3.0\mu\text{m}$ 。选取锡林浩特地区轻度污染大气和沙尘天气,计算结果如图4.6所示。

3月19日为晴空日,AOD日变化峰值小于0.9,但中午大气气溶胶光学厚度最大值一度超过0.7,各通道AOD日均值为 $0.35\sim 0.42$ 之间,认为当日大气轻度污染,初步判断为灰霾日。此时本地处于春季,认为大气中的气溶胶主要为沙尘气溶胶图4.6(a)中,粒径小于 $0.3\mu\text{m}$ 气溶胶的浓度随时间变化不明显,而粒径范围在 $0.3-3\mu\text{m}$ 范围气溶胶的浓度随时间变化显著增加,认为该粒径范围内气溶胶的增加,是造成大气气溶胶光学厚度增大的主要原因。

2月19日为扬沙天气,历史记录显示,气象台于13:39发布扬沙天气警报。对比图4.6(b),各粒径范围气溶胶的浓度出现了不同程度的增加,尤其以 $0.3\sim 3\mu\text{m}$ 粒径范围内的气溶胶最为

显著, 其浓度值增大都超过了一个量级。认为该地区沙尘气溶胶主要以粒径大于 $0.3\mu\text{m}$ 的气溶胶为主, 当 $0.3\sim 3\mu\text{m}$ 粒径范围的气溶胶浓度增加超过一个量级, 沙尘天气发生。

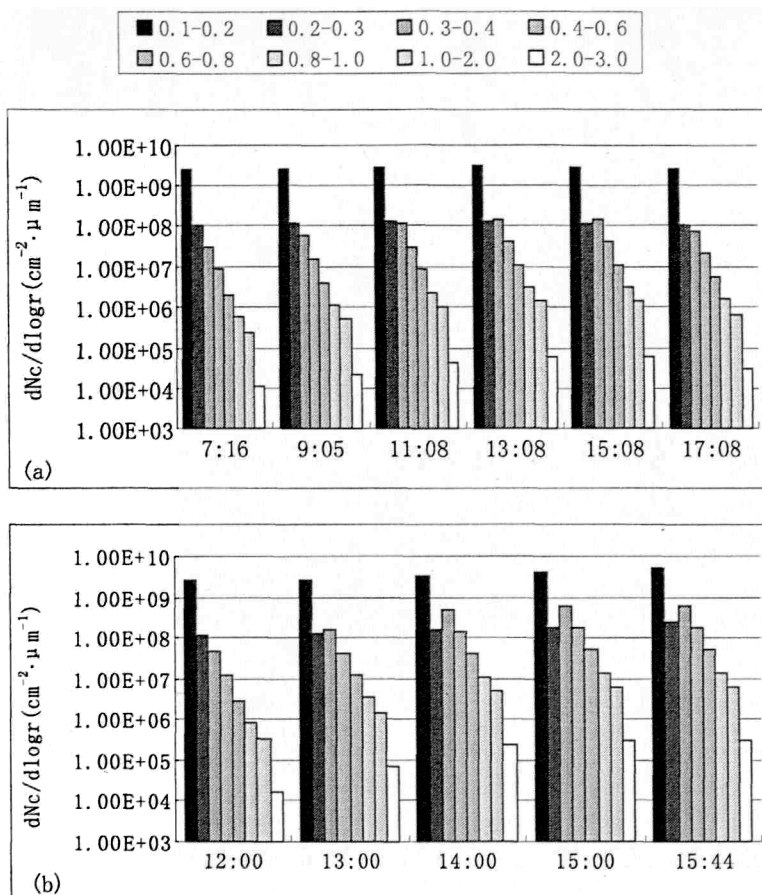


图 4.6 锡林浩特地区(a)3 月 19 日轻度污染大气(b)2 月 19 日沙尘天气粒子谱随时间演变

从气溶胶对人体健康的影响而言, 粒径 $5\sim 10\mu\text{m}$ 的粒子可到达支气管, $5\mu\text{m}$ 以下的可进入细支气管和肺泡。气溶胶粒子越小, 进入人体呼吸系统的部位就越深, 并因各种原因被吸附或滞留在不同的部位。小于 $1\mu\text{m}$ 的在肺泡内沉积率最高, 小于 $0.4\mu\text{m}$ 的粒子可能随呼吸排出体外而沉积较少, 其它被吸附或滞留在呼吸道或肺泡表面的粒子可能被人体免疫系统清除, 也可能进入血液、或长期滞留于肺泡形成病灶。因此, 本节采用消光法反演 $0.1\sim 3\mu\text{m}$ 粒径区间气溶胶粒度谱, 对轻度污染大气及沙尘天气条件下气溶胶浓度的变化进行监测, 具有实际意义。

4.3 小结

沙尘天气条件下, 且无云干扰, 太阳光度计反演得垂直大气柱气溶胶光学特性与水平

能见度存在较好的相关性。其中, AOD、大气浑浊度与能见度呈乘幂关系, 波长指数与能见度呈对数关系。利用这些关系式, 由能见度资料拟合沙尘天气AOD, 可以减少云对光度计反演结果的干扰, 提高太阳光度计资料的利用率。同时, 综合考虑大气水平和垂直两个方向的要素, 可以提高对沙尘天气监测预警的精度。

对于沙尘天气这样的异常低能见度事件, 大气在垂直方向和水平方向的光学特性具有一定可比性。大气水平方向的消光, 如能见度等已作为划分沙尘天气等级的标准之一。而CE318太阳光度计, 具有较高的观测精度和较丰富的反演产品, 对沙尘天气条件下大气的光学特征有良好的反映, 其反演结果常用于卫星资料的检验订正, 但观测资料易受到云干扰。结合能见度仪和太阳光度计, 则能更好的了解沙尘天气的发生发展情况。当光度计反演得到的AOD突然剧增, 数值超过1; 同时能见度仪数值突然骤减(拟合得到的AOD相应剧增, 数值亦超过1), 则往往伴随着沙尘天气的发生发展。采用该方法, 一定程度上能使沙尘天气预警时间得到提前(个例分析结果显示, 预警时间提前了30min)。

采用消光法反演气溶胶粒度谱, 由于该方法对 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 的大粒子谱分布的反演结果更为稳定, 而初始函数选取Junge分布比较能反映 $0.1\sim 5.0\mu\text{m}$ 的谱分布特征, 同时由于消光因子对大粒径粒子消光效应的不敏感性, 本文采用消光法反演轻度污染大气和扬沙天气条件下, 粒径在 $0.1\sim 3\mu\text{m}$ 之间的气溶胶谱分布特征, 得到的反演谱较为接近真实谱的分布形式。

采用锡林浩特地区资料研究发现, 当反演结果显示 $0.3\sim 3\mu\text{m}$ 粒径区间的气溶胶浓度剧增且超过一个量级时, 则往往反映了大量的大粒径气溶胶输送而至, 即伴随着沙尘天气的发生发展, 因此可以作为监测预警沙尘天气的指标之一。

第五章 主要结论与创新点

5.1 软件开发与应用

大气气溶胶光学特性的地基观测，由于其理论发展和较易维护，成为当前研究气溶胶科学问题的重要观测平台。中国气溶胶观测网络CAeroNet在我国北方建立了20个沙尘暴监测站，设有太阳光度计(CE318-2)、能见度仪等先进仪器和设备。本文根据实际应用需求，研制“基于CE318太阳光度计的沙尘监测预警系统”，首次在国内CE318光度计的观测业务中，实现了观测数据的自动反演计算、时序图显示和反演结果保存，无须人工干预。在气溶胶观测研究、特别是在我国北方沙尘天气的监测预警中，凸显了该仪器自动跟踪观测的优势。

配套开发的历史资料处理软件通过添加云处理方案，来获得更高质量的反演结果。结合消光法计算气溶胶粒度谱，该软件将为监测和分析大气气溶胶光学特性提供一种有效的分析工具。

目前软件已应用到仪器的实际观测中。进一步，本系统将结合卫星资料，定量分析微量气体和痕量气体对气溶胶光学特性的影响，获得更丰富、更精确的反演产品。

5.2 沙尘天气监测预警

本文利用锡林浩特地区CE318太阳光度计资料研究表明：太阳光度计滤光片年衰减率可达20%以上。本文提出提取符合背景大气条件的晴天数据Langley定标后，计算定标系数年变化曲线，可以插值计算得到各月定标系数，进而提高反演结果精度。

锡林浩特地区晴天资料主要表现出早晚小，中午高的特点。红外波段通道反演的AOD日变化峰值显示出从春季向冬季递减的规律，可见光波段AOD在春季出现最高值，并在9月再次出现较高峰值。沙尘天气条件下，云的发生发展可以引起光度计反演结果日变化曲线出现多峰值。而云随沙尘气溶胶传输路径移动发展是干扰太阳光度计反演结果的主要原因。而云、气溶胶相互作用，又增加分析云辐射强迫的难度。多云天气条件下，简单采用云处理算法将造成大量观测数据流失，需要通过其它途径获得云光学厚度信息来提高观测资料的利用率。本文引入了能见度仪资料。

无云干扰沙尘天气条件下，太阳光度计反演得垂直大气AOD、大气浑浊度与水平能见

度呈乘幂关系，波长指数与能见度呈对数关系，相关性达80%以上。对于沙尘天气这样的异常低能见度事件，大气在垂直方向和水平方向的光学特性具有一定可比性。能见度反映大气水平方向的消光，已作为划分沙尘天气等级的标准之一。而CE318太阳光度计，具有较高的观测精度和较丰富的反演产品，对沙尘天气条件下大气的光学特征有良好的反映，可以为沙尘天气的预报提供较为准确的客观依据。结合两者，当光度计反演得到的AOD突然剧增，数值超过1；同时能见度仪数值突然骤减（拟合得到的AOD相应剧增，数值亦超过1），则往往伴随着沙尘天气的发生发展。采用该方法，一定程度上能使沙尘天气预警时间得到提前（个例分析结果显示，预警时间提前了30min）。另一方面，能见度仪资料不受云干扰，结合两者，提高了光度计的资料利用率。

采用消光法反演气溶胶粒度谱，锡林浩特地区，当粒径范围 $0.3\sim 3\mu\text{m}$ 的气溶胶浓度剧增且超过一个量级时，往往反映了大量大粒径的气溶胶输送而至，即伴随着沙尘天气的发生发展，因此可以作为监测预警沙尘天气的指标之一。另一方面，粒径处于该范围的气溶胶对人体呼吸系统的影响相对最大，采用消光法反演该粒径范围气溶胶粒度谱，对监测大气污染程度和关注人类健康，都具有实际意义。

进一步，笔者将尝试提高粒度谱反演精度，获得更大粒径区间范围的、符合实际谱分布情况的粒度谱，进而计算气溶胶体积谱、吸收谱等，构建沙尘气溶胶辐射模型，并研究沙尘气溶胶气候效应。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 辛金元, 王跃思, 李占清, 等. 中国地区太阳分光辐射观测网的建立与仪器标定[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1697-1702.
- [3] Li Z. Aerosol and climate: A perspective from East Asia [A], In : Observation , Theory , and Modeling of the Atmospheric Variability [C]. World Scientific Pub. Co., 2004, 501-525.
- [4] Schwartz S E, Andreae M O. Uncertainty in Climate change caused by aerosols[J]. Science, 1996, 272:1121-1122.
- [5] Satheesh S K, Moorthy K K. Radiative effects of natural aerosols: a review [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(11): 2089-2110.
- [6] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. Nature, 2001, 409: 695-697.
- [7] Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC), Climate Change 2000, 2001. The Scientific Basis-Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. New York: Cambridge University Press.
- [8] Haywood J M, Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review [J]. Revs. Geophys., 2000, 38: 513-543.
- [9] 邱金桓, 潘继东, 杨理权, 等. 中国 10 个地方大气气溶胶 1980~1994 年间变化特征研究[J]. 大气科学, 1997, 21(6): 725-733.
- [10] 延昊, 矫梅燕, 毕宝贵, 等. 国内外气溶胶观测网络发展进展及相关科学计划[J]. 气象科学, 2006, 26(1): 111-117.
- [11] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. AERONET——A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(1): 1-16.
- [12] Holben B N, Tanre D, Smirnov A, et al. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol Optical Depth from AERONET [J]. Geophys. Res., 2001, 106: 12067-12097.
- [13] 任宜勇, 李霞, 吕鸣, 等. CE318 太阳光度计观测资料应用前景及其解读[J]. 气象科技, 2006, 34(3): 349-352.

- [14]李海萍, 熊利亚, 庄大方. 中国沙尘灾害遥感监测研究现状及发展趋势[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 46-52.
- [15]中国科学院地学部. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J]. 地球科学进展, 2000, 15(4): 361-364.
- [16] Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC), Climate Change 2007: The Physical Science Basis, 2007. Summary for Policymakers-Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Summary for Policymakers.
- [17]Roosen, R.G., R.J.Angione, et al. Worldwide variations in atmospheric transmission, 1.baseline results from Smithsonian observations [J]. Bull.Am.Meteorol.Soc., 1973, 54: 307-316.
- [18]Shaw G.E.. Atmospheric turbidity in the Polar regions[J]. Appl.Met., 1982a, 21: 1080-1088.
- [19]Volz, F.E.. Turbidity at Uppsala from 1909 to 1992 from Sjostroms solar radiation measurement[J]. Sued. Meteorol.Hydrol. Inst.Rep, 1968, 28: 100-104.
- [20]Herber,A., L.W.Thomason, V.F.Radionov, et al. Comparison of trends in the tropospheric and stratospheric aerosol optical depths in the Antarctic[J]. Geophys.Res., 1993, 98: 18441-18447.
- [21]D'Almeida, G.A.. On the variability of desert aerosol radiative characters[J]. Geophys.Res., 1987, 92: 3017-3216.
- [22] D'Almeida, G.A.. A model for Saharan dust transport[J]. Clim., 1996, 25: 903-916.
- [23] Hlben,B.N, A.Setzer, T.F.Eck, et al. Temporal and spatial variability of aerosol optical depth in the Sahel region in relation to vegetation remote sensing[J]. Int.J.Remote Sens, 1991, 12: 1147-1163.
- [24] 邱金恒, 孙金辉, 夏其林, 等. 北京大气气溶胶光学特性的综合遥感和分析[J]. 气象学报, 1988, 46: 49-57.
- [25] Ben Mohamed, A.J.P.Frangi, J.Fontan, 等. Spatial and temporal variations of atmospheric turbidity and related parameters in Niger[J]. J.Appl.Meteorol, 1992, 31: 1286-1295.
- [26]Gushchin, G.P. The Methods, Instrumentation and Results of Atmospheric Spectral Measurements[J]. Gidrometeoizdat,St.Petesburg, 1988, 200.

- [27] 刘海隆, 刘洪斌, 王伟, 等. 大气气溶胶光学特性与遥感图像光谱相关性分析[J]. 地球信息科学, 2005, 3: 81-86.
- [28] 罗云峰, 吕达仁, 李维亮, 等. 近 30 年来中国地区大气气溶胶光学厚度的变化特征[J]. 科学通报, 2000, 45 (5): 549-554.
- [29] 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 等. 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.
- [30] 韩永, 肖霞云, 赵凤生. 根据太阳辐射反演沙尘粒子光学厚度个案分析[J]. 光散射学报. 2006. 17(4): 372-377.
- [31] 吕达仁, 周秀骥, 邱金桓. 消光—小角度散射综合遥感气溶胶分布的原理与数值试验[J]. 中国科学, 1981, 12: 1516 —1523.
- [32] 邱金桓, 汪宏七, 周秀骥, 吕达仁. 消光—小角度散射法遥感气溶胶分布的实验研究[J]. 大气科学, 1983, 7(1): 33—41.
- [33] 李放, 吕达仁. 利用消光谱反演气溶胶复折射率的一种新方法及其应用[J]. 遥感技术与应用, 1995, 10(2): 1-7.
- [34] 黎洁, 毛节泰. 光学遥感大气气溶胶特性[J]. 气象学报, 1989, 47(4): 450-456.
- [35] 赵增亮, 毛节泰. 联合反演大气气溶胶光学特性和地面反照率[J]. 大气科学, 1999, 23(6): 722-732.
- [36] 邵鸿飞, 毛节泰. 适于反演陆面大气气溶胶光学厚度的物理量[J]. 中国科学技术大学学报, 1999, 29(6): 684-690.
- [37] 祁栋林, 黄建青, 乜虹. 瓦里关地区太阳直接辐射的分光测量[J]. 青海气象, 1999, 2: 17-19.
- [38] 邱金桓. 从全波段太阳直射辐射确定大气气溶胶光学厚度I: 理论[J]. 大气科学, 1995, 19(4), : 395-394.
- [39] 邱金桓, 潘继东, 杨理权. 中国10 个地方大气气溶胶1980~1994年间变化特征研究[J]. 大气科学, 1997, 21(6): 725-733.
- [40] 张玉香, 胡秀清, 刘玉洁, 等. 北京地区大气气溶胶光学特性监测研究[J]. 应用气象学报, 2002, 13 (Suppl), 136-143.
- [41] 李霞, 胡秀清, 崔彩霞, 等. 南疆盆地沙尘气溶胶光学特性及我国沙尘天气强度划分标准的研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 488-495.
- [42] 沈建国, 李嘉鹏, 牛生杰. 沙尘天气中气溶胶光学特性的时空分布特征[J]. 中国沙漠,

2006, 27 (3): 495-501.

[43]李成才, 毛节泰, 袁自冰. MODIS卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用[J]. 中国科学D辑地球科学2005, 35Supl (1): 177-186.

[44] Engel-Cox J A, Christopher H H, Basil W C, et al. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38: 2495-2509.

[45]Wang J, Christopher S A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM_{2.5} mass: Implications for air quality studies[J]. Geophysical Research Letters, (21):Art. No.2095, doi: 10.1029/2003GL018174.

[46]Lau Kai-Hon Alexis, Li Chengcai, Mao Jietai, et al. A new way of using MODIS data to study air pollution over the Pear River Delta[J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 4891: 105-114.

[47] 毛节泰, 刘莉, 张军华. GMS5卫星遥感气溶胶光学厚度的试验研究[J]. 气象学报, 2001, 59 (3): 359-352.

[48] 张军华, 斯召俊, 毛节泰, 等. GMS5卫星遥感中国地区气溶胶光学厚度[J]. 大气科学, 2003, 27 (1): 23-35.

[49] 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 利用MODIS 资料遥感香港地区高分辨率气溶胶光学厚度[J]. 大气科学, 2005, 29 (3): 335-342.

[50] 唐家奎, 薛勇, 虞统, 等. 陆地气溶胶遥感反演——利用TERRA 和AQUA 双星MODIS数据协同反演算法[J]. 中国科学D辑地球科学, 2005, 35 (5): 474-481.

[51] 毛节泰, 李成才, 张军华, 等. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比[J]. 应用气象学报, 2002, 13(Suppl): 127-135.

[52] 刘新罡, 吕达仁, 肖稳安, 等. 北京晴天紫外波段气溶胶光学厚度反演与分析[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(1): 52-57.

[53]<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>, 2006年5月访问.

[54]A. Smirnov, B. N. Holben, T. F. Eck, et al. Cloud-Screening and Quality Control Algorithms for the AERONET Database[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 73: 337-349.

[55]刘玉杰, 牛生杰, 郑有飞. 用CE-318太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特性[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(5): 615-622.

[56]刘菲, 牛生杰. 北方沙尘气溶胶光学厚度和粒子谱的反演[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(6): 775-781.

- [57]Heuklon, T.K.V. Estimating Atmospheric Ozone for Solar Radiation Models[J]. Solar Energy, 1979, 22, 63-68.
- [58]盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [59] Byung-Gon Kim, Mark A.Miller, Stephen E.Schwartz, et al. The role of adiabaticity in the aerosol first indirect effect[J]. J.Geophys.Res., 2008, 113(D0): 5210-5222.
- [60]刘玉芝, 石广玉, 赵剑琦. 一维辐射对流模式对云辐射强迫的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2007, 31(3): 486-494.
- [61]陈丽, 银燕, 杨军, 等. 沙尘气溶胶对云和降水影响的模拟研究[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(5): 590-600.
- [62] Huang J P, M innis P, L in B, et al. Possible influences of A sian dust aerosols on cloud properties and radiative forcing observed from MODIS and CERES [J]. Geophys Res Lett, 2006, 33 (5): L06824, doi: 10.1029 /2005GL024724.
- [63]王玉洁, 黄建平, 王天河. 一次沙尘暴过程中沙尘气溶胶对云物理量和辐射强迫的影响[J]. 干旱气象, 2006, 24(3): 14-18.
- [64]张军华, 王美华, 毛节泰. 多波段光度计遥感气溶胶误差分析及订正[J]. 大气科学, 2000, 24(6): 855-859.
- [65]Shaw G E. Error analysis of multi-wavelength sun photometry[J]. Geophys, 1976, 114: 1-14.
- [66]王先华, 乔延利, Philippe Goloub, 等. 应用于全球气溶胶观测网的太阳辐射计辐射定标系统[J]. 光学学报, 2008, 28 (1) : 87-91.
- [67]Beat Schmid, Christoph Wehrli. Comparison of sun photometer calibration by use of the Langley technique and the standard lamp[J].Appl. Opt.,1995,34(21): 4500-4512.
- [68]刘志刚, 王英舜, 等. 内蒙古锡林郭勒盟牧业气候区划[M].北京:气象出版社,2006.
- [69]Rosenfeld D, Lensky I M. Spaceborne sensed insights into precipitation formation processes in continental and maritime clouds[J]. Bulletin of American Meteorological Society, 1998, 79: 2457-2476.
- [70]韩晶晶, 王式功, 祈斌, 等. 气溶胶光学厚度的分布特征及其与沙尘天气的关系[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 362-369.
- [71]邱玉珺, 邹学勇, 张春来. 沙尘天气发生频率对大气能见度方差的影响研究:以北京及其沙尘过往路径典型站点为例[J]. 环境科学, 2006, 27(6): 1046-1051.

- [72]徐晓峰, 张小玲, 李青春. 北京地区一次强沙尘天气过程的气象因子及空气污染状况分析[J]. 气象科技, 2003, 31(6): 321-327.
- [73]赵秀娟, 陈长和, 袁铁, 等. 兰州冬季大气气溶胶光学厚度及其与能见度的关系[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 617-622.
- [74]秦大河, 杨德保, 尚可政, 等. 沙尘暴[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [75]King M D, Byrne D M, Herman B M, et al. Aerosol size distribution obtained by inversion of spectral optical depth measurement[J]. J Atmos Sci, 1978, 35(11): 2153-2167.
- [76]李放, 吕达仁. 珠穆朗玛峰地区大气气溶胶光学特性[J]. 大气科学, 1995, 19(6): 755-763.
- [77]Vitale V, Tomasi C, Lupi A, et al. Retrieval of columnar aerosol size distributions and radiative-forcing evaluations from sun-photometric measurements taken during the CLEARCOLUMN(ACE2)experiment[J]. Atmos Environ, 2000, 34 (29-30): 5095-5105.
- [78] Heintzenberg J, Muller H, Quenzel H, et al. Information content of optical data with respect to aerosol properties: numerical studies with a randomized minimization-search-technique inversion algorithm[J]. Applied Optics, 1981, 20 (8): 1308-1315.
- [79]刘吉, 陈长和. 兰州城区冬季大气气溶胶粒子谱的反演研究[J]. 高原气象, 2004, 23(1): 103-109.
- [80]HERMAN B M, BROWING S R, REAGAN J A. Determination of aerosol size distributions from lidar measurements[J]. J.Atmos.Sci., 1971, 28: 763-771.
- [81]Phillips D L. A technique for the numerical solution of certain integral equations of the first kind[J]. J Assoc Comput Mach, 1962, 9: 84-97.
- [82]YAMAMOTO G, TANAKA M. Determination of aerosol size distribution from spectral attenuation measurements [J]. J.Appl.Opt., 1969, 8: 447-453.
- [83]辛金元, 张文煜, 袁九毅, 等. 消光法反演腾格里沙漠地区沙尘气溶胶谱分布[J]. 高原气象, 2004, 23(5): 654-659.
- [84]周秀骥, 李维亮, 罗云峰. 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟[J]. 大气科学, 1998, 22: 418-427.
- [85]邱金桓, 孙金辉. 沙尘暴的光学遥感及分析[J]. 大气科学, 1994, 18(1): 1-10.
- [86]夏祥鳌, 王普才, 陈洪斌, 等. 中国北方地区春季气溶胶光学特性地基遥感研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(4): 429-437.

参加科研项目、论文及参加学术活动情况

➤ 参加科研项目情况：

1. 国家自然科学基金（40575048，40765001）；
2. 科技部社会公益专项（2005DIB3J108）；
3. 教育部博士点基金（20050300002）

➤ 论文情况：

1. 许丹,牛生杰,王静,等.基于 CE318 光度计沙尘监测预警系统的研制与应用.南京气象学院学报.
2. 许丹,牛生杰,刘菲,等.云对我国北方光度计观测精度的影响分析.中国沙漠.

➤ 学术交流及实践情况：

1. 2005 年 11 月,参加第八届全国气溶胶会议暨第二届海峡两岸气溶胶技术研讨会(江苏 南京);2007 年 5 月参加“Global Dimming, Brightening and Related Issues in the Climate Change”国际学术研讨会(江苏 南京);2008 年 4 月参加“International Workshop on Anthropogenic Change on Asian Monsoon”国际学术研讨会(江苏 南京)。
2. 2006 年 7 月参加“云、气溶胶与辐射相互作用”首届暑期培训班;2007 年 7 月参加“2007 年大气化学中的基本理论和实践”研究生暑期学校。
3. 2007 年 4 月赴内蒙古锡林浩特国家气候观象台实习;2008 年 1 月赴南京江宁国家级气象基站实习。2006 年 12 月,2007 年 11 月参加南京地区雾的外场综合观测实验;2007 年 7 月参加近地层气象要素的野外观测实验。
4. 2007 年 8 月赴内蒙古气象台,合作交流“基于 CE318 太阳光度计的沙尘监测预警系统”;2007 年 11 月,软件正式发表。2008 年 4 月 18 日,软件获得中华人民共和国国家版权局颁发的“计算机软件著作权登记证书”。

致 谢

在此论文完成之际，特别感谢我的导师牛生杰教授！三年来，牛生杰教授渊博的学识、严谨的治学态度、勤奋忘我的敬业精神和虚怀若谷的崇高人格风范都给我留下了深刻的印象，让我终生受益！导师孜孜不倦的教诲和精益求精的工作作风，深深感染和激励着我，是我今后做人和做学问的楷模！

在论文完成过程中，还得到美国纽约国家实验室刘延刚研究员的关心和指导，在此深表感谢！

衷心感谢陕西省人影办刘贵华、戴进老师在卫星资料处理中给予的指导和帮助！

感谢AERONET/NASA NUIST站点数据负责人朱彬教授、王静实验员提供的帮助和支持！

衷心感谢所有帮助和指导过我的老师！你们渊博的学术造诣和忘我的工作精神给我留下了深刻的印象，你们的指导给了我巨大的帮助，使我受益匪浅。

感谢南京信息工程大学提供这样良好的学习环境！感谢所有帮助和激励过我的各位同窗好友们！深深感谢你们的鼓励和支持！

感谢我的家人对我学业的支持和理解，是你们给了我战胜困难的勇气和力量！

许 丹

2008.5.12