

大气气溶胶物理光学特性研究进展^{*}

韩 永^{1)†} 王体健¹⁾ 饶瑞中²⁾ 王英俭²⁾

1) 南京大学大气科学系大气环境研究中心, 南京 210093)

2) 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所大气光学研究中心, 合肥 230031)

(2007 年 11 月 2 日收到, 2008 年 4 月 1 日收到修改稿)

大气气溶胶粒子作为地气系统的重要组成成分之一, 在紫外、可见到红外很宽的波段内对辐射传输产生影响, 一方面通过对电磁波的散射和吸收作用, 导致光波的能量衰减; 另一方面则把吸收的能量转化为其本身的热能, 起到加热大气的作用. 这一过程在直接和间接的辐射气候效应的模拟、激光大气传输、高分辨率光谱研究、地基和空基遥感、大气辐射订正、环境监测技术、目标探测和识别、陆上交通和航空航海都有着重要作用. 详细阐述了大气气溶胶物理光学特性近年来的研究进展, 为气溶胶科学后续研究工作的更好开展提供参考.

关键词: 大气光学, 大气气溶胶, 物理光学特性, 研究进展

PACC: 9265, 9265V, 9260M, 9400

1. 引 言

作为地球大气的重要组成部分的大气气溶胶, 是气体和在重力场中具有一定稳定性的、沉降速度小的粒子的混合系统, 同时也是指悬浮在大气中的直径在 0.001—100 μm 的液体或固体微粒体系, 是大气环境中组成复杂、危害较大的污染物之一, 其光学、化学特性也是大气物理学研究内容之一. 气溶胶对太阳辐射的吸收和散射会改变地球大气系统的行星反照率, 从而影响到地气系统的能量平衡; 大气气溶胶还起到云凝结核的作用; 大量的气溶胶颗粒有可能使云滴的数密度增加, 云滴的平均半径变小, 这有可能使云对太阳辐射的反射率增加或使云的维持时间加长, 甚至使降水减少. 这些都会影响到地气系统的能量平衡、目标环境特性和激光大气传输等^[1-12].

不同来源的气溶胶组成成分、形状尺度不同, 其气候环境效应也不同, 因此, 对大气气溶胶物理特性的研究必须综合考虑各种影响因素.

2. 气溶胶物理和光学特性的直接测量方法

大气气溶胶的光学特性, 决定于气溶胶粒子的尺度、形状、组成、数浓度、质量浓度和表面积浓度等相关参数. 只有通过观测和实验, 才能取得具有代表性的可靠资料. 为此应对探测仪器的基本原理、测量精度以及使用条件有深入地了解, 以便在资料的分析中能够正确的应用. 下面, 我们将简单的分别对气溶胶的粒子收集、浓度和相关的光学参数的测量设备进行说明.

2.1. 空气分离和气溶胶粒子收集方法

空气分离和气溶胶收集技术常基于过滤、重力和离心沉积、惯性碰撞、扩散、拦截以及静电或热沉降的原理^[7]. 从大气中分离和收集气溶胶粒子的简单、高效和经济的方法是过滤, 此法应用最广泛. 常把能让大气气体成分通过并把其中的颗粒分离和收集的器件通称为滤器. 可分为两类: 一类是纤维滤器; 另一类是多孔膜滤器. 当携带粒子的气流突然转弯时, 由于惯性, 粒子将因撞击在不透气的收集片上而被附着, 空气则绕过收集片. 为防止粒子撞击弹离

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 40805006), 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2006CB403703, 2006CB403706), 南京大学人才引进科研启动基金(批准号: X20722410111), 国家科技支撑计划(批准号: 2007BAC03A01)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: HanYong@nju.edu.cn

和被气流带走,收集片表面涂有黏性材料.沉积收集器主要有两种:一种是重力沉积收集器,用于收集大粒子(直径大于 $2.5 \mu\text{m}$),例如,沉积皿,其原理是大的气溶胶粒子在风力和重力的作用下进入沉积皿;另一种是离心沉积收集器,可收集 $0.1\text{--}1 \mu\text{m}$ 尺度范围内的气溶胶粒子.

2.2. 气溶胶浓度的测量

2.2.1. 大气气溶胶粒子的密度

粒子本身的化学组成决定了其密度的大小,气溶胶的密度通常为大块的相同材料密度的 $1/2\text{--}1/10$ 倍^[13].用电子天平和专门设计的比重瓶,分别测量样品的质量和体积,从而可以计算出大气气溶胶粒子的密度,其精度可达 $\pm 2\%$.用差分迁移分析仪(DMA)碰撞技术可以测量直径在 $0.06\text{--}0.18 \mu\text{m}$ 范围内的大气气溶胶粒子的密度.对于已知几何尺寸和空气动力学尺寸的粒子,其测量精度可达 $\pm 4\%$.大气气溶胶粒子的密度一般在 $0.40\text{--}1.53 \text{g}/\text{cm}^3$ 之间.

2.2.2. 大气气溶胶粒子的水分

水分是大气气溶胶的一种重要组成成分,空气相对湿度(RH)大于 70% 时,它对大气气溶胶粒子质量的贡献急剧增加.空气相对湿度超过 80% 时,水分约占细粒子质量的一半以上^[14,15].通过对粒子成分、RH 大于 80% 时粒子水分含量的急剧增加的测量来确定气溶胶水分含量.大多数离子盐都是水溶性的,如氯化钠、硫酸盐和硝酸盐.近来的研究表明有机化合物也可能对气溶胶含水量有重要影响.利用基于主要微粒种类成分的热力学模式可以计算微粒含水量.这种方法的局限性是当前的热力学模式没有考虑与有机物相关的水分含量.将大气气溶胶粒子过滤在玻璃纤维膜上,通过微波共振测量其介电常数也可以测定气溶胶含水量.微波共振能够测量 RH 小于 70% 时大气气溶胶粒子的含水量. RH 从 50% 增大到 70% 时,气溶胶含水量从 10% 增大到

70% .此外,利用敏感的微量天平通过测量大气气溶胶粒子质量对 RH 的敏感性也可以测量水分含量.

2.2.3. 气溶胶粒子质量浓度测量方法

1) 滤膜采样称重法

测量颗粒物质量浓度最常用的技术是过滤.在控制温度和相对湿度的情况下,在采样前后对滤膜进行称重,滤膜质量的增加量除以相应时间的采样气体体积就得到采样期间的平均颗粒物质量浓度^[16].采集气溶胶粒子的主要滤膜有纤维、颗粒床和核孔膜等.各种滤膜采集粒子的原理是近似的.因为粒子直径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的粒子的扩散能力和采集效率都随着粒子尺寸的减小而增加,所以对于这种粒子采用扩散法采集.粒子直径大于 $0.5 \mu\text{m}$ 的粒子用截留法和碰撞法采集,采集效率随粒子的增大而提高.直径在 $0.1\text{--}0.5 \mu\text{m}$ 范围内粒子的采集效率与滤膜的性质和空气通过滤膜的流速关系密切.采集大气气溶胶粒子的多种测量滤膜的采集效率大于 99% ,但大孔径滤膜的效率要低些.滤膜的水分吸收/吸附作用、活性物质的挥发以及称重误差等因素导致颗粒物质量浓度测量值较大的误差.

2) 气溶胶粒子质量浓度自动测量方法

测量大气气溶胶粒子质量浓度的自动法包括 β 射线测量计、压电晶体和振荡元件仪器.目前测量大气悬浮颗粒质量浓度常用的仪器是颗粒物质量监测器.它有多种型号,分别用于测量总悬浮颗粒物(TSP)的质量浓度和空气动力学直径小于 $10 \mu\text{m}$ 、 $2.5 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m}$ 大气气溶胶粒子的质量浓度,单位是 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.2.4. 数浓度测量

针对粒子的不同尺度范围和不同的分散相(液态或固态粒子),其测量尺度的方法如表 1 所示.由于大气气溶胶粒子尺度跨越 5 个数量级,故对其整个尺度分布的测量,应采用各种方法进行联合测量.下面简要介绍常用的测量气溶胶粒子尺度和数浓度的方法.

表 1 大气气溶胶各种探测技术相应的尺度范围

固体或液体分散介质	方法	超显微	光学显微镜	光散射	沉积	离心沉积	撞击
	尺度范围/ μm	0.01—2	0.4—100	0.1—30	1—50	0.05—20	0.05—30
固体分散介质	方法	电子显微	扩散分离	电迁移	吸附	凝结核计数	渗透
	尺度范围/ μm	0.0005—5	0.002—0.05	0.005—1	0.002—50	0.001—0.15	0.5—100

凝结核计数器(CNC),也称作凝结粒子计数器(CPC)和爱根核计数器(ANC),用于测量大气气溶胶

粒子总的数密度.其原理是先对包含有大气气溶胶粒子的密闭容器加压,接着进行绝热膨胀,然后对形

成的液滴进行计数.液滴的尺寸一般比气溶胶粒子的尺寸大 100—1000 倍.CNC 可以测量到的最小粒子尺寸 r_{\min} 可达 $0.003 \mu\text{m}$,因此它对测量小粒子数密度非常有用.云凝结核(CCN)计数器通过测量在特定过饱和蒸汽中由水凝结于气溶胶粒子上形成的云滴数目来测量云凝结核数密度.云凝结核数密度与气溶胶粒子的尺寸分布和成分有关.直径大于 $0.04 \mu\text{m}$ 的粒子可作为云凝结核.CNC 的准确性由其探测方法决定:单粒子计数器的主要由采样率、读数以及可探测最小尺度等的不确定性决定;间接测量型的则主要与标定曲线的准确性、仪器的稳定性、信噪比、最小可探测尺度以及采样误差等有关^[17].

2.3. 尺度谱分布测量

直接测量大气气溶胶谱分布的设备主要有光学粒子计数器、空气动力学粒子计数器、扫描迁移粒径分析仪、扩散池和凝结核计数脉冲高度分析仪等,也可以通过测量小采样体积气溶胶粒子在不同入射波长时的散射系数来反演气溶胶粒子谱分布.比如,利用差分吸收光谱技术可以检测气溶胶的谱分布和反演气溶胶参数^[18,19].这里介绍光学粒子计数器(OPC)和空气动力学粒子计数器(APS3321).

2.3.1. 光学粒子计数器(OPC)

OPC 是利用粒子的光散射特性来测量气溶胶粒子的数密度谱和浓度的.它一般由电源系统、光学系统和信号处理系统三部分组成.大气气溶胶粒子通过光照区时所散射的光信号被光电倍增管接收并转换为电脉冲(称为响应量),电脉冲的幅度用来确定粒子的大小,电脉冲的计数用来确定粒子的浓度.OPC 的测量结果与仪器照明系统的结构、会聚棱镜系统的结构以及大气气溶胶粒子的尺寸、形状、折射率等密切相关.目前可用的 OPC 种类比较多.根据散射角 ψ 的不同,OPC 可分为同轴型($\psi = 0^\circ$)和旁轴型($\psi = 28^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 和 90° 等).根据使用光源的不同,OPC 可分为白光型和激光型等.白光型测量的粒子半径下限 r_{\min} 为 $0.2 \mu\text{m}$,激光型的 r_{\min} 为 $0.05 \mu\text{m}$,因此前者适合于测量尺寸比较大的大气气溶胶粒子,后者适合于测量尺寸小于激光波长的细粒子^[20].

2.3.2. 空气动力学粒子计数器

空气动力学粒子计数器又叫飞行时间粒谱仪,它是用来测量粒子通过一个喷嘴后加速气流中的速度,从而获得气溶胶粒子谱的设备^[21-23],如商业性

的仪器 APS3321 空气动力学粒子计数器.其原理是当经过快速加速的气溶胶通过一个喷嘴时,由于惯性作用,大气气溶胶粒子往往滞后于气流.大气气溶胶粒子尺寸和密度越大,其惯性越大,因此大气气溶胶粒子速度和气体速度的差异也就越大.边散射光则由一个椭圆镜进行收集,并聚焦到一个固态光电探测器上,它可以把光脉冲转化为电脉冲.通过对两个脉冲尖峰进行电子计时,就可以计算出每个粒子的运动速度.速度信息储存在飞行时间储存器中.使用聚苯乙烯橡胶(PSL)球进行标定,并将此信息固化于存储器中.APS3321 检测粒子的范围是 $0.5\text{—}20 \mu\text{m}$.如果单独使用光散射信号,也可以探测到 $0.3\text{—}0.5 \mu\text{m}$ 范围内的粒子.另外,APS3321 还可以存储相应的光散射信号数据和飞行时间数据.在测量空气动力学粒子尺寸时,气溶胶通过喷嘴后温度和气压大大降低,这引起相对湿度的变化,从而可能影响测量的粒子尺寸.液滴形状的改变也会导致测量尺寸的误差.该设备的浓度测量精度为 $\pm 10\%$.

2.4. 光散射特性测量方法

关于气溶胶散射系数测量设备,我们在这里主要给出两种:前向散射能见度仪和积分浊度计.

2.4.1. 前向散射能见度仪

前向散射能见度仪是以测量大气介质前向散射光获得大气消光系数从而得到大气能见度的仪器.前向散射能见度仪除了发射器和接收器之外,还有相应的仪器控制单元电路.主散射角 33° ,采样空间体积为 200 cm^3 .当光照射到采样空间的大气粒子和分子上时,接收器就会接收到相应的散射光信号.在根据光电转换及相应的计算就可以得到大气能见度.

关于大气能见度的研究已经有很长的历史:18 世纪后半期,法国研究者 Bouger 提出了大气透明度的概念;19 世纪, Rayleigh 接着研究这一问题,他处理了关于空气和其他小的球形粒子散射问题; Middleton 所写的书中包含了关于能见度的理论及相关的研究^[24];1924 年 Koschmieder 提出了在各种大气情况下关于目标物的可视范围的基础理论研究^[25];1965 年,美国空军剑桥研究实验室出版了一本关于地球环境的理论、大气光学和电磁波通过大气的透过率方面的书,这些论述奠定了能见度的理论基础^[26];从 1700 年到 1998 年的研究为高级能见度传感器的发展奠定了基础,并且使可视技术也得

到了加强^[27-31]。此外还有摄像法和激光雷达法,透射表测量能见度方法简单,被安装在很多重要机场的跑道上。

2.4.2. 积分浊度计

积分浊度计是一种能够探测气溶胶粒子散射特性的高精度仪器^[32-35]。目前,它广泛应用于气溶胶粒子的散射/消光系数 σ_{sp} 的测量,在地基和机载应用项目中还被用于能见度、边界层气溶胶的光学厚度的测量以及粒子谱的反演^[36-42]。

浊度计测量大气光的散射方法由 Beuttell 和 Brewer 首先研究^[43],并设计出第一批积分浊度计。这些仪器可以产生一个近似于余弦权重散射函数的信号,其量值为散射部分的消光系数。Charlson 完成了标准积分浊度计的初始设计^[44]。该仪器主要测量气溶胶的散射系数 σ_{sp} 。在全球气候模式中它是一个重要参数。最初,该设备用于战时军事行动中夜间对水平能见度的估测。随着光学测量电子技术的发展,特别是经过 Crosby 和 Kaerber 以及 Charlson 和 Ahignist 两次较大的技术改进^[45,46],开发了多波长浊度计,使用一个像先前 Charlson 浊度计的光路设计。到 20 世纪 80—90 年代,利用积分浊度计测量不同化学组分气溶胶的散射作用,广泛用于评估气溶胶直接引起的气候效应的测量研究。比如:1970 年中期,NOAA(GMCC 即 Geophysical Monitoring for Climate Change,现在是 CMDL 即 Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory)项目在四个背景站安装了多波长积分浊度计,分别是阿拉斯加的巴罗,夏威夷岛莫纳罗亚山(夏威夷岛的活火山),美国萨摩亚群岛(南太平洋),南极,在这四个基准背景站上,连续纪录大气气溶胶的光散射数据^[47-53]。

国内关于积分浊度计的应用研究工作开展的较少,且集中在对大气气溶胶的散射系数和沙尘粒子光学特性的监测上^[54-56]。

2.5. 大气气溶胶复折射指数测量

大气气溶胶粒子的存在直接影响了光在大气中的传播,造成光在大气中的衰减。大气中气溶胶粒子对光的散射和吸收特性是影响激光束传播的主要因素之一,特别是气溶胶粒子对光的吸收可导致高能激光光束热晕效应的发生和大气击穿。气溶胶粒子折射率虚部 m_i 是决定大气气溶胶吸收特性的重要参数,在大气辐射收支平衡中起着重要的作用,气溶胶辐射强迫效应的正负在很大程度上取决于其折

射率虚部的大小。因此,许多研究人员对气溶胶粒子折射率虚部(m_i)的测量方法进行了研究^[57-60]。如果能够测量得到气溶胶粒子的吸收系数,则可以在对大气气溶胶的特性做了某些假定的前提下采用 Mie 散射理论推算出 m_i ,也可以通过测量单个或小采样体积的气溶胶粒子在不同散射角的散射函数来反演气溶胶的折射率。气溶胶粒子对光的吸收,还造成了大气中一些气溶胶粒子间以及气溶胶粒子和气体间的光化学反应,产生了很多尚不可测的影响。目前,关于气溶胶对光的吸收及复折射指数的测量已有很多报道^[58-69]。

对气溶胶复折射指数 m_i 的测量方法可以简单概括为三类:1)测量气溶胶粒子吸收光的能量后产生的声波来确定粒子的吸收系数,即光声光谱法,可以进行实时测量。使用能量较高的入射光可提高测量的灵敏度,但会造成粒子中某些成分的蒸发而引起测量误差^[70]。2)测量直接采样得到的气溶胶粒子样品的吸收系数,如积分片法^[71]。该方法简单易行,因此较为常用。由于积分片法在测量中改变了气溶胶粒子的自然悬浮状态,滤膜收集到的粒子的光学特性可能与实际大气中情况有所不同。还有,该方法忽略了多次散射效应和后向散射以及一些界面反射等的影响,这些都可能会造成较大的测量误差。3)反演方法,比如根据 OPC 测量的粒子谱分布对气溶胶折射率虚部敏感的特点,利用 OPC 和太阳辐射计同时测量的结果确定气溶胶折射率虚部,并同积分片法的测量结果进行了对比,结果较为合理。测量碳元素,因为元素碳是大气气溶胶中的主要吸光物质,所以可通过测量气溶胶中元素碳的含量来研究气溶胶的吸收特性^[72]。

3. 大气气溶胶光学遥感研究方法

当进行大范围的气溶胶特性研究时,上述直接测量方法很难满足要求,为此发展了遥感测量技术。气溶胶粒子对入射辐射的散射和吸收作用可以使入射辐射的性质和强度发生变化,通过测量入射辐射的变化可以反演气溶胶粒子特性,这是遥感气溶胶的基本原理。利用遥感方法可以直接得到气溶胶辐射特性,并用于气候研究过程。气溶胶物理光学特性的遥感方法可以分为两类:主动探测(主动遥感)和被动探测(被动遥感)^[73]。激光雷达(包括车载和地基激光雷达探测)属于主动探测;运用卫星遥感、太

阳辐射计等被动探测手段也可以获得气溶胶粒子的光学特性.

3.1. 利用太阳直接辐射遥感气溶胶光学厚度

近 30 年来,太阳分光光度计作为一种简单而又经济的技术来遥感气溶胶的光学特性和水汽含量,它是气溶胶光度学观测的一种常用方法^[74].实际应用中,光度计的波段选择、半波宽度、仪器定标(Langley 方法)、吸收气体的影响以及观测条件等方面的因素都可能带来误差,许多作者对此作过分析^[75-87].此外,利用窄波段光度计测量气溶胶光学厚度是一个比较准确有效的方法,但目前还不具备在全国范围内布点进行常规遥感的条件,而国内有几十个日射站全年进行全波段太阳直射辐射的测量,充分利用这些辐射资料研究大气气溶胶物理和光学特性是有意义的^[88-90].

3.2. 消光-小角散射法遥感气溶胶谱分布

光谱消光法(也称 Langley 法)和小角散射法(也称华盖天空亮度法)是两个遥感气溶胶光学厚度、谱分布的经典方法.1981 年,吕达仁等从研究气溶胶的消光系数和散射相函数入手,发现气溶胶消光系数和前向小角散射相函数分别对较小(如小于 $1 \mu\text{m}$)气溶胶粒子和较大(大于 $1 \mu\text{m}$)粒子比较敏感,根据这一特性分析了光谱消光法和小角散射法在反演气溶胶谱分布的不同优缺点,提出了一个综合应用气溶胶的消光系数和小角散射相函数反演谱分布的一个新方法,即消光-小角散射法,大大提高了气溶胶谱分布的反演精度^[91-93].

利用天空辐射和天空偏振含有气溶胶信息,也是反演谱分布另一条思路^[94-96].使用多个波长测得的光学厚度可以反演更符合实际的谱型的光学参数^[97].使用 Phillips 和 Twomey 发展的解第一类 Fredholm 积分方程的线性反演方法,利用多波段上的气溶胶光学厚度反演谱分布的工作,为以后的反演研究奠定了基础^[98-100].在反演中考虑了多次散射,这是一个重大的改变,为使用日晕之外的散射奠定了基础^[101].在分析多次散射影响的基础上,固定复折射指数,适用日晕和天空散射的数据反演 $0.05-10 \mu\text{m}$ 范围内的粒子谱分布,是具有代表性的研究工作之一^[102,103].

华盖计是利用测量太阳附近的天空亮度(华盖区)反演气溶胶特性的一种方法,最早是由

Deirmendjian 在 1957 年提出^[104,105].这个区域较强的天空亮度主要是由于气溶胶粒子较强的一次前向散射引起的.通过测量气溶胶的直接消光和华盖区天空亮度,可以反演较大半径粒子的气溶胶光学厚度、粒子谱等信息^[106,107].发展影响辐射气候效应气溶胶光学厚度的反演算法、单粒子测量技术和非球形粒子光散射的计算方法成为现今气溶胶基础研究方向之一^[108-110].邱金桓等在详细分析了天空亮度与气溶胶光学特性和地面反照率关系的基础上,通过测量 $1^\circ-30^\circ$ 的体散射函数、 10° 的散射相函数、 40° 的加权相函数以及 90° 的天空亮度分别反演了气溶胶粒子谱、气溶胶折射率实部、虚部以及地面反射率^[88,89].考虑到中、高层大气在曙暮光形成中起主要作用,曙暮光被人们用来遥感平流层气溶胶消光系数分布等信息.在这一研究方面,我国学者建立了一个球面大气的 Monte Carlo 辐射传输算法,发展了一个应用曙暮光信息反演气溶胶特性.综合应用实测的曙暮光资料和激光探测的后向散射比来反演北京地区平流层气溶胶光学厚度^[106,107].

此外,利用多光谱、多角度天空散射以及消光观测可以同时反演气溶胶粒子谱分布、复折射指数和单次散射反照率^[111].这个反演方案将物理模型和反演算法相对独立的分别考虑,基于对反演噪声影响的统计优化估计,在考虑测量存在误差的前提下,拟合了物理模型中的多个参数,通过确定经过平滑的最优解,是目前较全面、精度较高的反演方案,并已业务运行^[112].

3.3. 激光雷达遥感

以上都是以太阳为光源的被动遥感,而激光雷达是一种主动遥感手段,利用激光雷达可以得到气溶胶的垂直分布信息^[113,114].激光探测气溶胶和云雨物理学特性以及能见度等大气光学现象是起步最早、应用最广的激光大气遥感研究领域,主要包括探测云高、云的层次、云中消光系数分布、云的偏振特性、雨强和雨滴谱^[115,116].大气气溶胶的消光系数分布、折射率和它的谱分布、沙尘暴、与气溶胶的物理光学特性有关的大气现象,如能见度、大气边界层高度、烟尘污染扩散等.在研制探测大气温度和大气中温室气体 CO_2 的 Raman 激光雷达时,也需考虑消除大气气溶胶光学特性的影响^[117-119].这类探测都依据激光后向(弹性)散射的原理^[120-125].激光雷达遥感又分为两种,一种是把激光雷达放置于地面上进

行对空探测;另一种是放在空中进行对地探测,比如利用机载和星载合成孔径雷达进行观测.表 2 给出

了几种典型的应用在遥感领域的空基合成孔径雷达系统^[126].

表 2 几种典型的遥感应用的空基合成孔径雷达(SAR)系统

国家	美国	美国	加拿大	德国	丹麦	中国
代号	NASA/JPL	P-3SAR	GEOBESAR	E-SAR	KRAS	CASSAR
极化	L,C,P	L,C,X	C,X	L,C,X	C	X
波段	四极化	四极化	四极化	HH,VV	VV	四极化
视角($^{\circ}$)	20—50	11—79	0—85	20—50	20—80	0—55
方位分辨率/m	2	2.24	6.20	2.5-4.5	2.4-8	10
距离分辨率/m	7.5	8.5	6.20	2.5-4.5	2.4-8	10
测绘带宽/km	7—12	6—13	22.62		10.40	35
峰值功率/kW	1	—	3.3-28	2.5	2	30
频带宽度/MHz	40	—	33	100	100	—
记录通道	12	4	3台磁带机	12	12	多带
处理类型	数字	数字	数字	数字	数字	光学
实时性	实时	实时	实时	无	无	无
高度/km	8	7—8	7	8	12	6—10
装备时间	1988年	1988年	1994年	1989年	1989年	1988年
配装机型	NASADC-3	NADC-P3	DLEDO288	DLRDO288	G-3	CESSNACIT,ATION S/11

3.4. 卫星遥感

地面遥感气溶胶可以得到较为准确的气溶胶信息,但是目前这种方法只能在有限的区域进行,不能用来遥感大范围气溶胶光学特性^[127—131].利用卫星遥感或者机载航空遥感系统可以弥补这个不足,特别是在环境恶劣的边远地区和广阔的海洋地区,卫星遥感方法更能显出它的优势^[132].国际上开展卫星遥感气溶胶的工作始于 20 世纪 70 年代中期^[133],中国科学家从 80 年代中期开始也进行了这方面的研究.1986 年赵柏林等利用 NOAA AVHRR 资料,进行了遥感海上大气气溶胶的研究^[134].周明煜等利用 NOAA AVHRR 资料分析了 1993 年 4 月北京、天津上空沙尘暴特性发现,在沙尘暴发生时,AVHRR 可见光通道 1 和可见光通道 2 的反射率都有增加,沙尘暴强度越大,反射率增加越大^[135].

4. 大气气溶胶的气候环境效应

当前气溶胶研究的一个最重要目标是科学评估大气气溶胶的辐射强迫与气候影响.气溶胶对气候和环境的辐射效应研究基本上是从 20 世纪 90 年代开始的,主要包含两部分内容:一是不同地区气溶胶

对周围环境的辐射气候效应研究,主要局限于局地气溶胶类型;二是气溶胶气候效应的模式研究,主要是从局域和全球尺度对气溶胶的气候效应进行模拟研究.

4.1. 气候效应

大气气溶胶的气候效应,既包含它与太阳辐射和地球辐射的相互作用,也具有相应的动力学变化,尤其是气溶胶的辐射吸收加热的动力效应,还包括地面-大气的水分循环过程^[136,137].最近一二十年来,先后出现的人工影响天气、酸雨、核冬天、北极霾、南极臭氧洞,以及突发性灾变事件等引起社会普遍关注的问题,无一不与大气气溶胶有关,而且都具有一定程度的气候效应^[138,139].有关气候变化的数值模拟,前几年主要致力于大气和海洋环流模式之间的耦合上,近年来森林火灾、火山喷发及中东地区油井大火已使新的气溶胶气候效应的模拟活跃起来.有关气溶胶的气候效应非常复杂,一般通过数值模拟进行分析和讨论,这是气溶胶影响气候的主要途径.人类影响气候研究(SMIC)的历次国际会议上多次强调长期监测背景气溶胶特征的必要性.WMO 明确建议组成全球本底污染监测网,其中选用了大气浑浊度作为监测大气气溶胶现有水平和长期变化的重

要参数. 由于气象能见度与大气光学厚度密切相关, 在一定条件下也可把它作为大气消光的直接反映. 在当前缺乏大气气溶胶长年观测资料的情况下, 可望利用气象台站的能见度资料, 配合其他气象要素, 分析空气质量的长期变化趋势. 气溶胶与辐射的相互作用, 主要通过影响地-气系统的辐射场, 其符号与温室气体的辐射强迫作用相反, 而量值与温室气体相比拟^[140-144]. 一般可分为直接影响和间接影响两个方面. 散射和吸收能量的相对量及气溶胶层的反射率受气溶胶粒子的单次散射反照率、不对称因子、气溶胶层的消光光学厚度以及下垫面或大气层的反照率的控制. 另外, 气溶胶作为云凝结核 (CCN), 它们的浓度、尺度和可溶性将明显地改变云

滴的浓度和尺度分布^[145, 146]. 尤其当人为源气溶胶粒子大量增加时, 将使 CCN 迅速增加^[147]. 其结果为云滴浓度增加和云滴平均尺度减小, 两者均使云的反射率增强. 同时较高的云滴浓度, 常抑制降水发展, 延长了低云的生命期. 人们已经利用一维气候模式进行了许多数值实验来帮助认识云在气候中所起的作用. 非黑体高云由于对太阳通量的透射和云体红外通量的发射而通常在对流层和平流层低层产生增暖效应. 由于中云和低云较强的反射而在大气中和地表面产生显著的冷却作用. 造成的增暖和冷却的程度取决于模式计算中使用的云的辐射性质和位置. 图 1 给出人类活动产生的气溶胶通过加强光散射和云的反照率与它们的气候辐射强迫相关流程图.

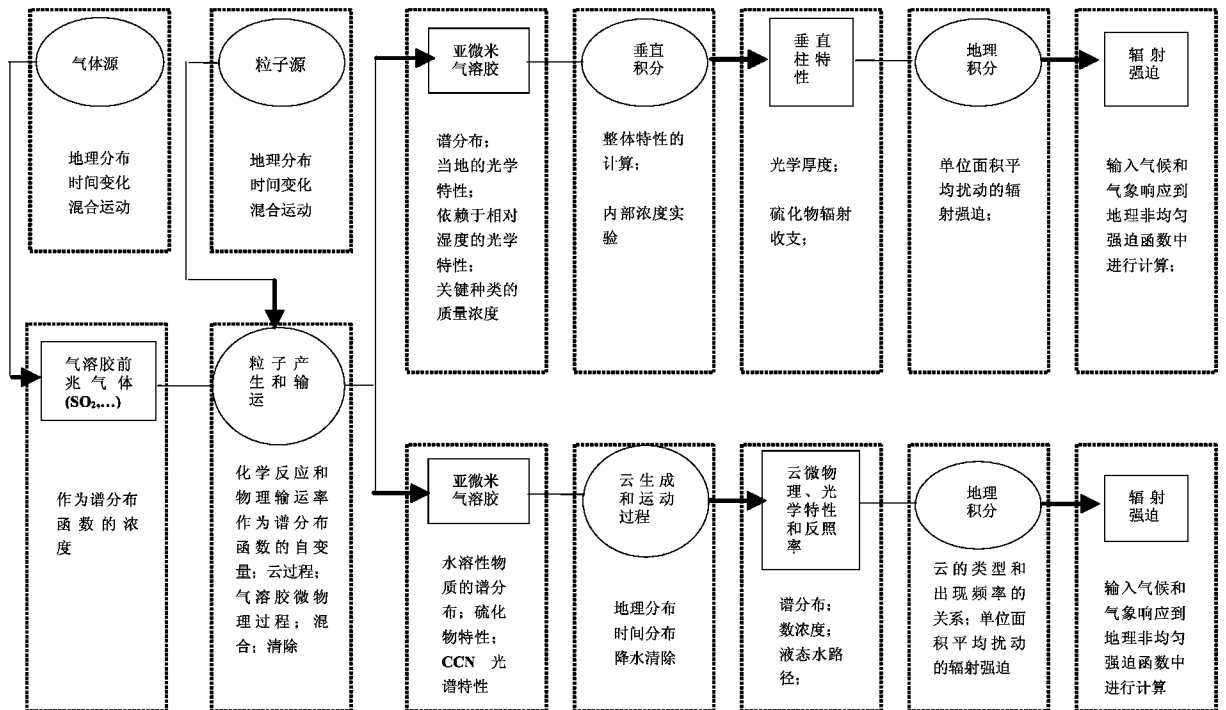


图 1 人类活动产生的气溶胶通过加强光散射和云的反照率与它们的气候辐射强迫相关流程图(图中椭圆表示过程, 矩形表示特性, 流程图下面的部分表示测量和研究目的^[146])

4.2. 环境效应

所谓空气中的颗粒物是指悬浮在空气中的固体颗粒与液体的混合物. 其中固体颗粒主要是指灰尘、可吸入颗粒物、微生物细胞和植物花粉等, 事实上它们都属于大气气溶胶的范畴.

研究表明, 大气颗粒物中含有许多有害物质, 同时也可能是其他污染物的载体. 特别是人类无节制的生产活动产生的大量的气溶胶粒子, 已经使人类的生存空间受到了严重的污染^[148]. 气溶胶粒子对人

类健康的影响一直是一个重要的话题. 流行病学研究已经发现人体肺部功能的下降、呼吸系统疾病的增多和正在逐年上升的发病率、死亡率与大气中气溶胶粒子浓度的上升存在着紧密的联系. 更进一步的研究发现那些粒径较小的气溶胶粒子, 特别是粒径小于等于 $2.5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$ 空气动力学粒径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的悬浮颗粒物) 的粒子, 比大粒子有着更强的危害性, 因为小粒子更容易进入人体肺部的深处并沉积下来, 从而引起炎症的发生, 导致肺的损伤. 而且小粒子具有更大的表面积对体积的比值, 活性更强,

因此美国环境保护署近年来要求对大气中的 $PM_{2.5}$ 制定新的标准. 在城市 PM_{10} (空气动力学粒径小于 $10 \mu m$ 的悬浮颗粒物)占到约 40% 左右,虽然不如 $PM_{2.5}$ 那样容易进入人体,但也是一种重要的污染源^[149,150].

城市化发展产生大量的气溶胶颗粒尤其是细粒子 PM_{10} 成分复杂,即包含有机污染气溶胶,也包含矿物气溶胶和硫酸盐等^[151,152]. 在核工业系统中,放射性气溶胶无时不在,无处不在,涉及到核能的和平利用与武器制造领域. 这些放射性物质在生产 and 操作过程中可能会产生放射性微粒物质而弥散于空气中形成放射性气溶胶. 因此,测定放射性气溶胶粒子的时空分布和粒度分布,研究它们的物理化学特征、变化规律及其传输过程一直是辐射防护科学研究的重要课题.

对于大气环境质量来说,空气污染又有室内和室外之分^[153,154]. 室内颗粒物与室内空气质量,室外颗粒物与室外空气质量的密切相关,它们都是评价大气环境质量的指标之一. 对一个地区而言,在污染变化相对稳定的情况下,气溶胶浓度不同主要是气象条件不同造成的,大尺度天气形势通过影响局地的气象条件而影响气溶胶的形成和输送. 关于这方

面的研究有:1) 沙尘质量浓度与气象条件,气溶胶的数浓度分布与相对湿度关系^[155,156]. 2) 大气稳定度对气溶胶的影响和粒子浓度与气象要素的相关模型等^[157]. 为了有效降低颗粒物浓度和提高大气环境质量,首要任务是识别大气颗粒物的来源,即污染源调查,然后尽可能地采取相关措施消除污染源. 对于当前经济快速发展的社会来说,仍然任重道远.

5. 结 论

本文从大气气溶胶的物理光学特性出发,详细阐述了大气气溶胶物理光学特性研究进展,包括气溶胶的源、粒子谱及散射和吸收系数等物理光学特性测量及遥感方法. 此外,还包括气溶胶的气候环境效应. 这将为大气气溶胶的进一步研究提供参考. 在未来的研究工作中,大气气溶胶的研究可以简要概括为两个发展方向:一方面发展新的探测设备和算法,探讨其微观物理光学和化学特性;另一方面研究气溶胶由于微观特性所表现出来的宏观效应(比如,大气气溶胶所表现出来的对气候、空间环境的影响以及在海洋大气耦合、全球能量循环中的作用等).

- [1] Gong Z B 1998 *Chin. J. Quant. Elect.* **15** 114 (in Chinese) [龚知本 1998 量子电子学报 **15** 114]
- [2] Wang Y J 1996 *Ph. D Thesis* (Hefei : Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics) 67 (in Chinese) [王英俭 1996 博士论文 (合肥 : 中国科学院安徽光机所) 67]
- [3] Rao R Z 1999 *Ph. D Thesis* (Hefei : Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics) 7 (in Chinese) [饶瑞中 1999 博士论文 (合肥 : 中国科学院安徽光机所) 7]
- [4] Rao R Z 2005 *Anhui Science and Technology Publish House* 38 (in Chinese) [饶瑞中 2005 光在湍流大气中的传播 (合肥 : 安徽科技出版社) 38]
- [5] Rao R Z 2006 *Infr. Laser Engin.* **35** 130 (in Chinese) [饶瑞中 2006 红外与激光工程 **35** 130]
- [6] Rao R Z 2006 *J. Atmos. Envir. Opt.* **1** 2 (in Chinese) [饶瑞中 2006 大气与环境光学学报 **1** 2]
- [7] Zhang C C, Zhou W X 1995 *Atmospheric Aerosol Tutorial* (Beijing : Meteorology Publishing House) 1 (in Chinese) [章澄昌、周文贤 编著 1995 大气气溶胶教程 (北京 : 气象出版社) 1]
- [8] Liao K N, Guo C L, Zhou S J, Zhou X J 2002 *An Introduction to Atmospheric Radiation* (Second edition) (in Chinese) [美] 廖国男 著, 郭彩丽、周诗健译 2004 大气辐射导论 (第二版) (北京 : 气象出版社) 1]
- [9] Van de H 1957 *Light Scattering by Small Particles* (New York : Wiley) 23
- [10] Ye H X, Yu Y Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 839 (in Chinese) [叶红霞、金亚秋 2008 物理学报 **57** 839]
- [11] Cheng W D, Luo L, Shen M Z, Wang L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6708 (in Chinese) [程卫东、罗 林、沈忙作、王 黎 2006 物理学报 **55** 6708]
- [12] Huang Y B, Wang Y J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6715 (in Chinese) [黄印博、王英俭 2006 物理学报 **55** 6715]
- [13] Zhang G Q 1987 *Aerosol Dynamics——based Theory of Dust Removal and Purifying* (Beijing : Environmental Science Publishing House) 56 (in Chinese) [张国权 1987 气溶胶力学——除尘净化理论基础 (北京 : 中国环境科学出版社) 56]
- [14] Hanel G 1976 *Adva. in Geophy.* **19** 73
- [15] Zhang X Q, McMurry P H, Hering S V, Casuccio G S 1993 *Atmos. Environ. A* **27** 1593
- [16] Yan F Q, Hu H L, Zhou J 2003 *Acta Opt. Sin.* **23** 855 (in Chinese) [阎逢旗、胡欢陵、周 军 2003 光学学报 **23** 855]
- [17] Han Y 2006 *Ph. D Thesis* (Hefei : Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics) (in Chinese) [韩 永 2006 博士论文 (合肥 : 中国科学院安徽光机所) 1]

- [18] Hao N , Zhou B , Chen L M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1529(in Chinese) 郝楠、周斌、陈立民 2006 物理学报 **55** 1529]
- [19] Si F Q , Liu J G , Xie P H , Zhang Y J , Dou K , Lin W Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3165(in Chinese) 司福祺、刘建国、谢品华 2006 物理学报 **55** 3165]
- [20] Yan F Q 2003 *Ph. D Thesis* (Hefei : Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics) (in Chinese) [阎逢旗 2003 博士论文(合肥 : 中国科学院安徽光机所)] 1]
- [21] Wilson J C , Liu B Y 1980 *J. Aerosol Sci.* **11** 139
- [22] Baron P A , Mazumder M K , Cheng Y S 1993 *In Aerosol Measurement Principles Techniques and Applications* (New York : Van Nostrand Reinhold) 36
- [23] Peters T M , David L 2003 *Aerosol Sci.* **34** 627
- [24] Middleton W E 1958 *Vision Through The Atmosphere* (Toronto : University of Toronto Press) 56
- [25] Koschmieder H 1924 *Beitr. Phys. freien Atm.* **12** 171
- [26] Valley S 1965 *Handbook of Geophysics and Space Environments* (New York : McGraw-Hill) 83
- [27] Mill C S , Lacey D , Gay M J 1994 *Meas. Sci. Tech.* **5** 1505
- [28] Bendix J 1995 *Geoscience and Remote Sensing Symposium 1995 1 GARSS '95 Int. J. Remote Sens.* 1847
- [29] Pomerleau D 1997 *IEEE conf. Intell. Transp. Sys.* (Boston : Mass) 906
- [30] Klass P 1998 *Avi. Week & Space Tech.* **22** 39
- [31] Bond T C , Theodore L A , Dave C 1999 *Aerosol Sci. Tech.* **30** 582
- [32] Virkkula A , Hillamo R E 1995 *J. Aerosol Sci.* **26** 451
- [33] Muralledharan T R , Radojevic M 2000 *Atmos. Environ.* **34** 2733
- [34] Shendrikar A D , Steinmetz W K 2002 *Atmos. Environ.* **37** 1383
- [35] Horvath H , Kaller W 1994 *Atmos. Environ.* **28** 1219
- [36] Hansen M Z , Evans W H 1980 *Appl. Opt.* **19** 3389
- [37] Heintzenberg J , Backlin L 1983 *Atmos. Environ.* **17** 433
- [38] Veeffing J P , vander H J , Ten B H 1996 *Atmos. Environ.* **41** 217
- [39] Blau H J , Cohen M L , Lapson L B , von T P , Ryan R T , Watson D 1970 *Appl. Opt.* **9** 1798
- [40] Li F , Nyeki S , Baltensperger U , Weingartner E , Lugauer M , Colbeck I , Giggeler H W 1997 *J. Aerosol Sci.* **28** S249
- [41] McKeed D , Cunningham A , Jones K 1997 *Opt. Laser Tech.* **29** 35
- [42] Kaller W 2004 *J. Quant. Spectr. Radi. Trans.* **87** 107
- [43] Beuttell R G , Brewer A W 1949 *J. Sci. Instru.* **26** 357
- [44] Charlson R J , Ahlquist N C 1971 *Integ. Neph.* U.S. Patent **3** 563
- [45] Charlson R J 1980 *Atmos. Tech.* **12** 10
- [46] Kapustin V N , Rozenberg G V , Ahlquist N C , Covert D S , Waggoner A P , Charlson R J 1980 *Appl. Opt.* **19** 1345
- [47] Bodhaine B A 1979 *Appl. Opt.* **18** 121
- [48] Bodhaine B A 1983 *J. Geoph. Res.* **88** 10755
- [49] Bodhaine B A 1989 *Atmos. Environ.* **23** 2357
- [50] Bodhaine B A , Harris J M , Herbert G A 1989 *Atmos. Environ.* **23** 2357
- [51] Bodhaine B A , Norman C A , Russell C S 1991 *Atmos. Environ.* **A 25** 2267
- [52] Rood M J , Covert D S , Larson T V 1987 *Tellus B* **39** 383
- [53] Rood M J , Shaw M A , Larson T V , Covert D S 1989 *Nature* **337** 537
- [54] Hu B , Zhang W , Zhang L , Chen C H , Feng G H 2003 *Plat. Mete.* **22** 354(in Chinese) 胡波、张武、张镭、陈长和、冯广泓 2003 高原气象 **22** 354]
- [55] Hu B , Zhang J , Zhang W , Chen C H , Zhang L 2005 *J. Lanzhou Univ. (Natural Sciences)* **41** 9(in Chinese) 胡波、张婕、张武、陈长和、张镭 2005 兰州大学学报(自然科学版) **41** 9]
- [56] Ke Z J , Yang J , Wang B Z , Yan P 2004 *Meteor. Sci. Tech.* **32** 258(in Chinese) 柯宗建、杨洁、王炳忠、颜鹏 2004 气象科技 **32** 258]
- [57] Gerber H E , Hndman E E 1981 *Bull. Am. Metro. Soc.* **62** 1321
- [58] Hu H L , Li X B , Zhang Y C , Li T 2006 *Appl. Opt.* **45** 3864
- [59] Zhao F S , Gong Z B , Hu H L , Masayuki T , Tadaihiro H 1997 *Appl. Opt.* **36** 7992
- [60] Zhao F S 1999 *Appl. Opt.* **38** 2331
- [61] Chin I L , Marcia B , Charlson R J 1973 *Appl. Opt.* **12** 1356
- [62] Hansen M Z , Evans W H 1980 *Appl. Opt.* **19** 3389
- [63] Bohren C F , Huffman D R 1983 (New York : Wiley) 47
- [64] Tian W S , Chen C H 1996 *Sci. Atmos. Sin.* **20** 235(in Chinese) [田文寿、陈长和 1996 大气科学 **20** 235]
- [65] Tian W S , Chen C H , Huang J G 1996 *J. Lanzhou Univ. (natural sciences)* **32** 126(in Chinese) [田文寿、陈长和、黄建国 1996 兰州大学学报(自然科学版) **32** 126]
- [66] Liu Y Y , Wang J B , Liu C Y 1998 *SPIE C* **3433** 118
- [67] Liu Y , Wang M X , Zhang R J 1999 *Clim. Environ. Res.* **4** 406
- [68] Chen L Y , Chou M C , Hang L K , Lin W Y , Chen C C , Jeng F T 2000 *Z. Aerosol Sci.* **31** 983
- [69] Yang X L , Wang J B , Liu Y Y , Wan D M 1997 *High Power Laser Parti. Beams* **9** 157(in Chinese) 杨小丽、王俊波、刘炎焱、万德明 1997 强激光与粒子束 **9** 157]
- [70] Memurry P H 2000 *Atmos. Environ.* **34** 1959
- [71] Lin C I , Baker M , Charlson R J 1976 *Appl. Opt.* **121** 1356
- [72] Guo Q C , Hu H L , Zhou J 1996 *Sci. Atmos. Sin.* **20** 633(in Chinese) 郭庆臣、胡欢陵、周军 1996 大气科学 **20** 633]
- [73] Brognieza G , Parola F , Becua L , Pelonb J , Jourdan O , Gayete F , Auriola F , Verwaerdea C , Baloisia J Y , Bahaiddin D 2004 *Atmos. Res.* **72** 425
- [74] Schmid B , Paul R S , Stuart F B 1998 *Appl. Opt.* **37** 3923
- [75] Shaw G E , Reagan J A , Herman B M 1973 *J. Appl. Meteor.* **12** 374
- [76] Shaw G E 1976 *Pure Appl. Geophys.* **114** 1
- [77] Shaw G E 1979 *Appl. Opt.* **18** 988
- [78] Deepak A , Box M A 1978 *Appl. Opt.* **17** 2900
- [79] Andrew A L , James E H 1974 *J. Atmos. Sci.* **31** 118
- [80] Zhou J , Wang Z , Han J C , Hu HL 1996 *Acta Meteor. Sin.* **10** 81
- [81] Zhang J H , Wang M H , Mao J T 2000 *Sci. Atmos. Sin.* **24** 855 (in Chinese) 张军华、王美华、毛节泰 2000 大气科学 **24** 855]
- [82] Mao J T , Li C C , Zhang J H , Liu X Y , Liu Q H 2002 *J. Appl. Meteor. Sci.* **13** 127(in Chinese) 毛节泰、李成才、张军华、刘晓阳、刘启汉 2002 应用气象学报 **13** 127]

- [83] Mao J T , Zhang J H , Wang M H 2002 *Acta Meteor. Sin.* **60** 625 (in Chinese) [毛节泰、张军华、王美华 2002 气象学报 **60** 625]
- [84] Richard A H , Tsay S C , Ji Q 2003 *Appl. Opt.* **42** 5533
- [85] Li Z Q , Zhao F S , Zhao W , Gao F , Tang J W 2003 *Chin. J. Quant. Elect.* **20** 635 (in Chinese) [李正强、赵凤生、赵 威、高飞、唐军武 2003 量子电子学报 **20** 635]
- [86] Li Z Q 2004 *Ph. D. Thesis* 1 (in Chinese) [李正强 2004 博士学位文 (合肥 : 中国科学院安徽光机所) 1]
- [87] Han Y , Fan W , Rao R Z , Hu H L , Wang Y J 2006 *Chin. J. Proc. Engin.* **6** 32 (in Chinese) [韩 永、范 伟、饶瑞中、胡欢陵、王英俭 2006 过程工程学报 **6** 32]
- [88] Qiu J H , Wang H Q , Zhou X J , Lü D R 1983 *Sci. Atmos. Sin.* **7** 33 (in Chinese) [邱金桓、汪宏七、周秀骥、吕达仁 1983 大气科学 **7** 33]
- [89] Qiu J H , Chen H B 2004 *Adv. Atmos. Sci.* **21** 475
- [90] Qiu J H 1995 *Sci. Atmos. Sin.* **19** 385 (in Chinese) [邱金桓 1995 大气科学 **19** 385]
- [91] Lü D R , Zhou X J , Qiu J H 1981 *Chin. Sci.* **12** 1516 (in Chinese) [吕达仁、周秀骥、邱金桓 1981 中国科学 **12** 1516]
- [92] Asano S , Yamamoto G 1976 *Appl. Opt.* **15** 2028
- [93] Yamamoto G , Tanaka M 1969 *Appl. Opt.* **8** 447
- [94] Sekera Z 1956 *Adv. Geophys.* **3** 43
- [95] Twitty J T 1975 *J. Atmos. Sci.* **32** 584
- [96] O'Neill N T , Miller J R 1984 *Appl. Opt.* **23** 3697
- [97] Quenzel H 1970 *J. Geophys. Res.* **12** 314
- [98] King M D , Byrne D M , Herman B M , Reagan J A 1978 *J. Atmos. Sci.* **22** 2153
- [99] Phillips D L 1962 *J. Assoc. Comput. Mach.* **9** 84
- [100] Twomey S 1963 *J. Assoc. Comp. Mach.* **10** 97
- [101] Box M A , Deepak A 1979 *Appl. Opt.* **18** 1376
- [102] Nakajima T , Tanaka M , Yamauchi T 1983 *Appl. Opt.* **22** 2951
- [103] Nakajima T , Tonna G , Rao R , Boi P , Kaufman Y , Holben B 1996 *Appl. Opt.* **35** 2672
- [104] Diermendjian D 1980 *Rev. Geophys. Space Phys.* **18** 341
- [105] Lenoble J 1993 (Hampton : A. Deepak Publishing) 503
- [106] Wu B Y , Lü D R 1989 *Sci. Atmos. Sin.* **13** 204 (in Chinese) [吴北、吕达仁 1989 大气科学 **13** 204]
- [107] Wu B Y 1998 *Atmospheric Radiative Transfer Practical Algorithms* (Beijing : Meteorology Publishing House) 1 (in Chinese) [吴北婴等 1998 大气辐射传输实用算法 (气象出版社) 1]
- [108] Sun X M , Ha H X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5565 (in Chinese) [孙贤明、哈恒旭 2008 物理学报 **57** 5565]
- [109] Pao J , Fang L , Gu X J , Hu R , Kong X H , Xia Z H , Xiong L Y , Zhang W J , Zhang Y Y , Zhen H Y , Zhu Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 320 (in Chinese) [鲍 健、方 黎、顾学军、胡 睿、孔祥和、夏柱红、熊鲁源、张为俊、张玉莹、郑海洋、朱 元 2004 物理学报 **53** 320]
- [110] Rao R Z 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1790 (in Chinese) [饶瑞中 1998 物理学报 **47** 1790]
- [111] Dubovik O , King M D 2000 *J. Geophys. Res.* **105** 20673
- [112] Dubovik O , Holben B N , Eck T F , Smirnov A , Kaufman Y J , King M D , Tanre D , Slutsker I 2002 *J. Atm. Sci.* **59** 590
- [113] Kunz G J , Leeuw G 1993 *Appl. Opt.* **32** 3249
- [114] Xie C B 2005 *Ph. D Thesis* 1 (in Chinese) [谢晨波 2005 博士学位文 (合肥 : 中国科学院安徽光机所) 1]
- [115] Cheng T H , Gu X F , Tian G L , Yu Tao , Chen L F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5323 (in Chinese) [程天海、顾行发、田国良、余涛、陈良富、2008 物理学报 **57** 5323]
- [116] Han Y P , Sun X M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 983 (in Chinese) [韩一平、孙贤明 2006 物理学报 **55** 682]
- [117] Cao K F , Hu H L , Hu S X , Su J , Wang L , Zhang Y C , Zhao P T , Zhao Y F 2008 *Chin. Phys. B* **17** 335
- [118] Wang S L , Su J , Zhao P T , Cao K F , Hu S X , Wei H L , Tan K , Hu H L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 394 (in Chinese) [汪少林、苏嘉、赵培涛、曹开法、胡顺星、魏合理、谭 锬、胡欢陵 2008 物理学报 **57** 394]
- [119] Hong G L , Zhang Y C , Zhao Y F , Shao S S , Tan K , Hu H L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 983 (in Chinese) [洪光烈、张寅超、赵曰峰、邵石生、谭 锬、胡欢陵 2006 物理学报 **55** 983]
- [120] Lü D R 1977 *Sci. Atmos. Sin.* **3** 199 (in Chinese) [吕达仁 1977 大气科学 **3** 199]
- [121] Sun J Q 1986 *Laser Atmospheric Sounding* (Beijing : Science Press) 1 (in Chinese) [孙景群编著 1986 激光大气探测 (北京 : 科学出版社) 1]
- [122] Zhou J , Yue G M , Qi F D , Jin C J , Wu Y H , Xiong L M , Chen Y H , Dou G D , Hu H L 1998 *Chin. J. Quant. Elect.* **15** 140 (in Chinese) [周 军、岳古明、戚福第、金传佳、吴永华、熊黎明、陈毓红、龚根娣、胡欢陵 1998 量子电子学报 **15** 140]
- [123] Wu Y H , Hu H L , Zhou J , Hu S X , Zhang M 2001 *Acta Opt. Sin.* **21** 1012 (in Chinese) [吴永华、胡欢陵、周 军、胡顺星、张 民 2001 光学学报 **21** 1012]
- [124] Zhang G X , Zhang Y C , Hu S X , Liu X Q , Yang L J , Tao Z M , Lü Y H , Cao K F , Tan K , Sao S S , Hu H L 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** 1015 (in Chinese) [张改霞、张寅超、胡顺星、刘小勤、杨陆军、陶宗明、吕勇辉、曹开法、谭 锬、邵石生、胡欢陵 2004 光学学报 **24** 1015]
- [125] Zhang Y C , Hu H L , Tan K , Liu X Q , Shao S S , Yang G C , Deng M , Zhang G Y , Yang L J 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** 1025 (in Chinese) [张寅超、胡欢陵、谭 锬、刘小勤、邵石生、杨高潮、邓 敏、张高勇、杨陆军 2004 光学学报 **24** 1025]
- [126] Zhu G L 1998 *Information Acquisition and Management* (Beijing : China Building Material Industry Publishing House) 253 (in Chinese) [朱贵岭 1998 信息获取与处理技术 (北京 : 中国建材工业出版社) 253]
- [127] Mao J T , Li C C , Zhang J H , Liu Q H , Hui Q H 2002 *J. Appl. Meteor. Sci.* **13** 127 (in Chinese) [毛节泰、李成才、张军华、刘晓阳、刘启汉 2002 应用气象学报 **13** 127]
- [128] Mao J T , Zhang J H , Wang M H 2002 *Acta Meteor. Sin.* **60** 625 (in Chinese) [毛节泰、张军华、王美华 2002 气象学报 **60** 625]
- [129] Li C C , Mao J T , Liu Q H , Alexis K H , Liu X Y , Liu G Q , Zhu A H 2003 *Chin. J. Atmos. Sci.* **27** 869 (in Chinese) [李成才、毛节泰、刘起汉、Alexis Kai-Hon、刘晓阳、刘桂青、朱爱华 2003 大气科学 **27** 869]

- [130] Han Y , Zhao F S , Zhang J 2003 *Chin. J. Quant. Elec.* **20** 222 (in Chinese) [韩 永、赵凤生、张 鉴 2003 量子电子学报 **20** 222]
- [131] Han Y , Xiao X Y , Zhao F S 2006 *Chin. J. Light Scatt.* **17** 372 (in Chinese) [韩 永、肖霞云、赵凤生 2006 光散射学报 **17** 372]
- [132] Zhu G L 1999 *Information Acquisition and Management* (Beijing : China Science and Technique Press) 27 (in Chinese) [朱贵岭 1999 信息获取与处理技术 (北京 : 中国科学技术出版社) 27]
- [133] Carlson T N , Wending P 1977 *J Appl. Meteor.* **16** 1368
- [134] Zhao B L , Yu X D 1986 *Chin. Sci. Bull.* **31** 1645 (in Chinese) [赵柏林、俞小鼎 1986 科学通报 **31** 1645]
- [135] Maria R P , Francesca B , Ferdinando D T , Gian P G , Anna M T 2004 *Appl. Opt.* **43** 5531
- [136] Wang J Y 1999 *Information Acquisition and Management* (Beijing : China Science and Technique Press) 53 (in Chinese) [王建宇 1999 信息获取与处理技术 (北京 : 中国科学技术出版社) 53]
- [137] Coakley J A , Cess R D , Yurevich F B 1983 *J. Atmos. Sci.* **40** 116
- [138] Fu P J , Wang S H , Chen C H 1998 *Adv. Earth Sci.* **13** 387 (in Chinese) [付培健、王世红、陈长和 1998 地球科学进展 **13** 387]
- [139] Hu R M , Shi G Y 1998 *Sci. Atmos. Sin.* **22** 919 (in Chinese) [胡荣明、石广玉 1998 大气科学 **22** 919]
- [140] Wang M X , Yang X 2002 *Clim. Envir. Res.* **7** 247 (in Chinese) [王明星、杨 昕 2002 气候与环境研究 **7** 247]
- [141] Zhao C S , Peng D Y , Duan Y 2005 *J. Appl. Meteor. Sci.* **16** 417 (in Chinese) [赵春生、彭大勇、段英 2005 应用气象学报 **16** 417]
- [142] Yan P , Li W L , Qin Y 2004 *J. Appl. Meteor. Sci.* **15** 629 (in Chinese) [颜 鹏、李维亮、秦 瑜 2004 应用气象学报 **15** 629]
- [143] Zhang X Y 2007 *Adv. Earth Sci.* **22** 12 (in Chinese) [张小曳 2007 地球科学进展 **22** 12]
- [144] Shi G Y , Wang X H , Zhang L S 2002 *Clim. Envir. Res.* **7** 256 (in Chinese) [石广玉、王喜红、张力盛 2002 气候与环境研究 **7** 256]
- [145] Yang P , Wei H L , Huang H L , Bryan A B , Yong X H , George W K , Michael I M , Qiang F 2005 *Appl. Opt.* **44** 5512
- [146] Charlson R J , Schwartz S E , Hales J M , Cess R D , Coakley J A , Hansen J E , Hofmann D J 1992 *Science* **255** 423
- [147] Huang M Y , Xu H Y 1999 (Beijing : Science Press) 1 (in Chinese) [黄美元、徐华英编著 (北京 : 科学出版社) 1999] 1]
- [148] Qiu J H , Chen H B , Wang P C , Lü D R 2005 *Chin. J. Atmos. Sci.* **29** 131 (in Chinese) [邱金桓、陈洪滨、王普才、吕达仁 2005 大气科学 **29** 131]
- [149] Chakrabartia B , Philip M F , Ralph D , Constantinos S 2004 *Atmos. Envir.* **38** 3329
- [150] Constantinos S , Seongheon K , Mingchih C , Lester L T , Henry G J 2000 *Atmos. Envir.* **34** 4829
- [151] Cheng T T , Lü D R , Chen H B , Li Z Q 2005 *Chin. J. Atmos. Sci.* **29** 147 (in Chinese) [成天涛、吕达仁、陈洪滨、李占清 2005 大气科学 **29** 147]
- [152] Tan J H , Bi X C , Duan Q C , Tang X L , Sheng G Y , Fu J M 2005 *J. Envir. Sci.* **25** 855 (in Chinese) [谭吉华、毕新慧、段菁春、唐晓玲、盛国英、傅家谟 2005 环境科学学报 **25** 855]
- [153] Shun C , Wai M , Chio H 2002 *Atmos. Envir.* **36** 225
- [154] Patrick N B , Timothy J B , Williams D A , Christopher M B , Seong J J , Barry M , Sukon K , Lee J S , Karen A C , Arlene M B , Cynthia S R , Gregory B D , Jerry A K , Adrian M M , Jean C B , Nowella B D , Peyton A E 2005 *Envir. Res.* **98** 167
- [155] Liu Y , Zhou M Y 1999 *Acta Ocean. Sin.* **21** 38 (in Chinese) [刘 毅、周明煜 1999 海洋学报 **21** 38]
- [156] Liu J , Chen C H 2004 *Plate. Meteor.* **23** 103 (in Chinese) [刘 吉、陈长和 2004 高原气象 **23** 103]
- [157] Yang D Z , Wang C , Wen Y P , Yu X L , Xu X B 1995 *J. Appl. Meteor. Sci.* **6** 18 (in Chinese) [杨东贞、王 超、温玉 、于晓岚、徐晓斌 1995 应用气象学报 **6** 18]

Progress in the study of physic-optics characteristics of atmospheric aerosols^{*}

Han Yong^{1,2)†} Wang Ti-Jian¹⁾ Rao Rui-Zhong²⁾ Wang Ying-Jian²⁾

1) *Atmosphere Environment Research Center , Department of Atmospheric Science , Nanjing University , Nanjing 210093 ,China)*

2) *Key Laboratory of Atmosphere Optics , Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics , Hefei Institutes of Physical Science , Chinese Academy of Sciences ,Hefei 230031 ,China)*

(Received 2 November 2007 ; revised manuscript received 1 April 2008)

Abstract

Atmospheric aerosol particles , as one of the important members in the earth atmosphere , can influence the radiative transfer from violet and visible light to infrared in a wide wave band. On one hand , by scattering and absorption of electromagnetic waves , they can induce the energy attenuation of light waves ; on the other hand , by turning the absorbed energy into the heat energy , they can heat up the atmosphere. This process directly or indirectly plays an important role in the simulation of radiate climate effect , the propagation of laser atmosphere , the high resolution spectrum , the ground and space remote sensing , the atmospheric correction , the environmental monitoring , the target detection and identification , and the overland traffics , aviation and navigation. We review the study of physics-optics characteristics of atmospheric aerosols , aiming at providing a reference for further study of atmospheric aerosols .

Keywords : atmospheric optics , atmospheric aerosol , physics-optics characteristics , research progress

PACC : 9265 , 9265V , 9260M , 9400

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.40805006) , the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos.2006CB403703 and 2006CB403706) and the Talent Introduced Foundation of Nanjing University (Grant No. 020722410111) and the National Scientific and Technical " Support " Program of China (Grant No.2007BAC03A01) .

[†] Corresponding author. E-mail : HanYong@nju.edu.cn