

范学花, 陈洪滨, 夏祥鳌. 2013. 中国大气气溶胶辐射特性参数的观测与研究进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 477–498, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12316. Fan Xuehua, Chen Hongbin, Xia Xiang'ao. 2013. Progress in observation studies of atmospheric aerosol radiative properties in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 477–498.

中国大气气溶胶辐射特性参数的观测与研究进展

范学花 陈洪滨 夏祥鳌

中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029

摘 要 长期系统的气溶胶辐射特性观测资料是定量研究气溶胶辐射和气候效应的重要基础。本文综合介绍中国大气气溶胶辐射特性观测与研究现状和成果, 重点包括以下内容: 地面太阳光度计联网观测气溶胶光学厚度、单次散射反照率、尺度谱; 从全波段太阳辐射反演气溶胶光学厚度、单次散射反照率; 浊度计和黑碳仪测量地面气溶胶散射系数和吸收系数; 地基/星载激光雷达观测气溶胶(后向散射系数)垂直分布; 极轨/静止卫星遥感反演气溶胶光学特性。

关键词 气溶胶辐射特性 地基观测 卫星遥感

文章编号 1006-9895(2013)02-0477-22

中图分类号 P41

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12316

Progress in Observation Studies of Atmospheric Aerosol Radiative Properties in China

FAN Xuehua, CHEN Hongbin, and XIA Xiang'ao

Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Long-term and systematic observation data of aerosol radiative properties creates an important foundation for the quantitative study of aerosol radiative and climatic effects. This paper introduces progress in observation studies of atmospheric aerosol radiative properties in China, emphasizing the following five aspects: (1) observations of Aerosol Optical Thickness (AOT), Single Scattering Albedo (SSA), and volume size distribution by using the ground-based sunphotometer network; (2) retrieval of AOT and SSA from whole-spectral solar direct radiation; (3) ground-based measurements of aerosol scattering and absorption coefficients by the nephelometer and the aethalometer; (4) ground-based and spaceborne lidar measurements of aerosol (backscattering coefficients) vertical distribution; and (5) remote sensing of aerosol optical properties from polar-orbiting and geostationary satellites.

Keywords Aerosol radiative properties, Ground-based measurements, Satellite remote sensing

1 引言

大气气溶胶是指悬浮在地球大气中沉降速度小、尺度范围为 $10^{-3} \sim 20 \mu\text{m}$ 大小的液态或固态粒子。气溶胶在气候系统中起着非常重要的作用, 通

过散射与吸收太阳短波和地球长波辐射对气候产生直接影响 (Coakley et al., 1983); 气溶胶又与云相互作用对气候产生间接影响 (Twomey and Warner, 1967; Twomey, 1977; Kaufman and Nakajima, 1993; Hansen et al., 1997; Forster et al., 2007); 同时, 非

收稿日期 2012-10-23, 2012-11-21 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB950804, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-QN201, 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05040202

作者简介 范学花, 女, 1978 年出生, 副研究员, 主要从事大气辐射及遥感方面的研究。E-mail: fxh@mail.iap.ac.cn

或弱吸收性气溶胶的辐射冷却效应还能在一定程度上抵消由温室气体造成的全球增温 (Charlson et al., 1992; Forster et al., 2007)。气溶胶粒子作为非均相反应界面间接影响大气化学过程, 从而改变温室气体等痕量大气成分; 此外, 对流层气溶胶, 尤其是近地面气溶胶粒子影响空气质量, 进而影响到环境和人类健康。

尽管第四次 IPCC 报告 (Forster et al., 2007) 对于气溶胶直接辐射的估计精度比之前 (Ramaswamy et al., 2001) 要高, 但相对于其他外源辐射强迫, 大气气溶胶辐射强迫估计仍然很不确定, 尤其是对气溶胶间接辐射效应的估计。为了减小大气气溶胶气候效应的不确定性, 国际上已经实施了数个较大气溶胶研究计划, 我国科学家也在气溶胶的观测、气溶胶辐射特性以及气溶胶气候效应估算等方面开展了许多基础研究工作。

本文拟综述我国, 特别是中国科学院大气物理研究所近一二十年来气溶胶辐射特性观测方面的研究进展和研究成果, 以期对后续气溶胶辐射气候效应研究有所借鉴。

2 气溶胶辐射特性参数

定量研究气溶胶辐射气候效应需要系统的气溶胶辐射特性观测资料。目前观测精度最高、观测手段最多、也是气溶胶气候效应中最为重要的光学特性是气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Thickness, AOT 或 Aerosol Optical Depth, AOD), AOT 描述了气溶胶对光的衰减作用, 是气溶胶消光系数在垂直方向上的积分。假设气溶胶粒子满足 Junge 谱分布, 两波长的 AOT 可用于计算反映气溶胶粒子大小的 Angstrom 指数。气溶胶粒子的单次散射反照率 (Single Scattering Albedo, SSA) ω_0 定义为气溶胶散射系数与消光系数比, 是衡量气溶胶吸收强弱的一个重要光学参数。研究表明, 单次散射反照率是决定气溶胶的辐射强迫是冷却还是加热效应的重要因子 (Hansen et al., 1997)。单次散射反照率与气溶胶粒子复折射指数有关。复折射指数是反映气溶胶粒子光散射和吸收能力的基本参数, 通常表示为: $n(\lambda) - k(\lambda)i$, 其中, $n(\lambda)$ 是复折射指数实部, 反映了粒子的散射能力, $k(\lambda)$ 是复折射指数虚部, 反映了粒子的吸收能力。实部和虚部大小与粒子组成成分及混合状态等有密切关系。这些参数是影响晴空地面直接辐射和天空散射辐射的重要因子, 基

于地基遥感手段并运用辐射传输理论, 可较为准确地反演大气柱气溶胶光学特性, 此外大气顶反射辐射卫星测量也是提取区域乃至全球尺度气溶胶光学特性的重要手段。

3 主要研究进展

3.1 地面观测气溶胶辐射特性

3.1.1 太阳光度计观测研究

地面太阳光度计通过测量可见到近红外波段范围内一系列窄波段大气对太阳直接辐射的消光, 在扣除空气分子影响后, 即可得到气溶胶的光学厚度。20 世纪 80 年代初, 北京大学就开始研制多波段太阳光度计, 赵柏林等 (1983) 用自主研制的 7 波段太阳光度计, 在北京地区开展了 1 年的地基观测并反演了气溶胶粒子谱。毛节泰等 (1983) 分析了这次遥感得到的 AOT 的特征、变化规律及与气象条件的关系。结果显示: 北京地区 AOT 最大值出现在 5 月份, AOT (500 nm) 为 0.65, 9 月份最小, AOT (500 nm) 为 0.31。气溶胶尺度谱是决定气溶胶光学特性的关键参数。吕达仁等 (1981) 从分析气溶胶消光系数和散射相函数基本特征着手, 发现气溶胶消光系数和前向小角散射相函数分别对细模态和粗模态气溶胶粒子敏感, 基于此系统分析了光谱消光法和小角散射法在反演气溶胶尺度谱分布中的优缺点, 从而创新性提出综合应用气溶胶消光系数与小角散射相函数反演气溶胶谱分布的新方法并开展数值试验和观测实验, 结果表明综合遥感能够发扬消光法和小角散射法的长处, 克服各自局限, 既能提高粗模态气溶胶粒子反演精度, 又能改善细模态气溶胶粒子反演结果。1980 年代中后期中国科学院大气物理研究所和北京大学等均开展了基于多波段光度计观测太阳直接辐射和天空散射辐射, 反演气溶胶散射相函数和尺度谱的观测实验 (Qiu et al., 1986; 黎洁和毛节泰, 1989)。1990 年代末, 北京大学研制出十波段太阳光度计, 利用所研制的太阳光度计在北京、青海、广东、浙江、西藏等地做了系统的 AOT 观测 (张军华等, 2000a, 2000b; Zhang et al., 2002; 刘桂青等, 2003; 朱爱华等, 2004), 所得资料不仅用于该地区气溶胶辐射特性及其变化规律的研究, 而且为校验卫星反演的 AOT 提供了数据。宋磊和吕达仁 (2006) 利用多波段手持光度计于 2000 年 6 月~2002 年 12 月在上海观测的太阳直接辐照度数据, 分析得到上

海 AOT 的季节变化, 显示夏季最大, 春季次之, 冬季最小。

国际气溶胶自动监测网 AERONET (Aerosol Robotic Network) 和中国气象局建立的气溶胶观测网络 (CAeroNet) 都是统一采用法国 CIMEL 公司研制的 CE-318 系列太阳光度计, 该光度计既可以自动进行太阳直射辐射观测, 观测波段包括 440、675、865、940 和 1020 nm。除了 940 nm 用于反演柱水汽含量外, 其他几个波段的太阳直接辐射观测用来计算相应波段的 AOT, 还可以与等高度角扫描、主平面扫描观测结合, 来反演气溶胶尺度分布、复折射指数、SSA 等特性参数 (Holben et al., 1998; 2001; Dubovik and King, 2000)。AOT 的精度可达 0.01~0.02 (Eck et al., 1999), 反演的水汽含量的精度约为 10% (Holben et al., 2001), SSA 的反演精度约为 0.03, 复折射指数实部的反演误差约为 0.04, 对强吸收粒子虚部的反演精度可达 30% (Dubovik et al., 2000)。作为 ACE-Asia (Aerosol Characterization Experiment-Asia) 气溶胶观测计划的一部分, 2001 年春季一台 CE-318 太阳光度计在中国科学院大气物理研究所楼顶进行了为期三个月的观测 (Xia et al., 2005); 另一台分别在河北香河 (2001 年 3 月 20 日~4 月 17 日) 和内蒙古桑根达来 (2001 年 4 月 20 日~5 月 10 日) 进行观测。2002 年 4 月北京成为 AERONET 观测网的长期观测站, 2004 年 9 月河北香河、2005 年 3 月河北兴隆也成为其长期观测站; 此外, 榆林、兰州、太湖、临安等地陆续建立了一些 CE-318 系列太阳光度计的长期和临时观测站点。

国内学者自 2000 年来比较系统的开展了基于 CE-318 太阳光度计气溶胶光学特性数据的分析研究。杨志峰等 (2008) 探索了 CE-318 型太阳光度计室内积分辐射源的辐亮度定标方法、Langley 定标法和标准仪器相对定标方法, 对仪器不同波段的太阳直射辐射通道进行了定标试验。Li et al. (2008) 提出一种增益校正的立体角定标方法, 该方法可以在太阳直射辐射和天空漫射辐射之间相互转换定标系数, 实现了替代辐射定标。Che et al. (2009a) 介绍了我国 CAeroNet 气溶胶观测网 CE-318 仪器的传递定标和 AOT 的验证。

胡秀清等 (2001) 采用 CE-318 太阳光度计在敦煌 (1999 年 6 月 28~7 月 19 日) 和青海湖 (1999 年 7 月 25~31 日) 的观测数据, 利用 Langley 方法

获得 AOT 及其光谱变化, 两地的 AOT (550 nm) 分别为 0.12 和 0.18。章文星等 (2002) 利用中分辨率太阳一天光光谱自动观测系统 (MORSAS) 在北京的准连续观测获取了 1998 年 9 月~2001 年 6 月的 AOT 和 Angstrom 指数, 并用 CE-318 的同期观测资料做了对比检验。Xia et al. (2006), 范学花 (2006) 分析了 AERONET 北京测站 2002 年~2005 年以来 AOT、Angstrom 指数、复折射指数和 SSA 的季节变化和年变化, 北京地区 AOT 的最大值出现在夏季, 最小值出现在冬季, 而春天由于受沙尘天气的影响, Angstrom 指数最小, 冬季 SSA 最小。毛乌素沙漠边缘榆林站 (车慧正等, 2004), 半干旱地区的乌鲁木齐 (李霞等, 2005) 和兰州 (张玉洁等, 2008), 背景站黑龙江龙凤山、浙江临亲和北京上甸子 (Che et al., 2009b; Wang et al., 2010) 及长江三角洲地区 (Pan et al., 2010; 徐记亮等, 2011; Yu et al., 2011; He et al., 2012) 也开展了类似的研究工作。Xia et al. (2008a) 利用全球 AERONET 和 MODIS 气溶胶光学厚度数据, 系统分析了全球陆地气溶胶光学厚度“周末效应”, 指出美洲东部, 欧洲西部 AOT 工作日显著高于周末, 且城市地区较郊区明显, 而在我国东部地区未检测到类似变化特征。基于全球 AERONET 长期站点气溶胶光学厚度和 Angstrom 指数数据, Xia (2011) 分析表明欧洲西部和美洲东部地区近 10 年来气溶胶光学厚度显著下降, 气溶胶粒子尺度参数分析表明该下降趋势可能与大气中细模态气溶胶浓度下降有关。印度 Kanpur 站表现出微弱上升趋势, 而北京站表现出微弱下降趋势。图 1 给出我国不同地区 5 个 AERONET 测站 (北京、香河、兴隆、太湖和兰州) 的 AOT (550 nm) 变化, 从中可以看出不同区域 AOT 的季节变化和年变化特征, 2009 年 5 个测站的 AOT 都达到最小, 可能与我国经济发展以及气象条件有关, 具体原因尚需探究。

Li et al. (2006) 联合 CE-318 太阳光度计直射太阳辐射、天空光总辐射强度和偏振辐射强度, 反演得到 SSA、气溶胶散射相矩阵、复折射指数和尺度分布, 并与 AERONET 反演产品做了比较检验, 该反演方法的优点是不依赖于气溶胶粒子形状假设, 对非球形粒子也适用。Wang et al. (2011a) 分析了 2005~2009 年北京地区的 AERONET 气溶胶资料, 发现北京地区的柱水汽含量与 AOT 之间有明显的相关, 且 440~870 nm 的 Angstrom 指数与

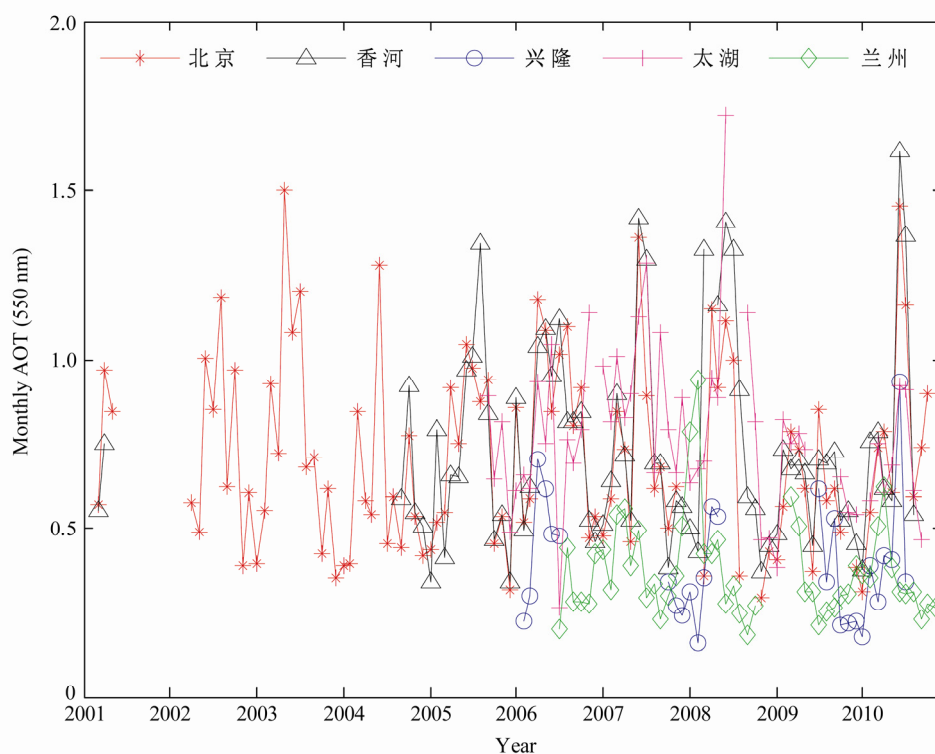


图1 我国不同地区 AERONET 站点观测的月平均 AOT (550 nm) 变化

Fig. 1 Monthly means of AOT at 550 nm for the five AERONET sites (Beijing, Xianghe, Xinglong, Taihu, and Lanzhou) in China

AOT 的细模态比显著相关, 基于 Angstrom 指数的气溶胶分类结果显示北京地区 AOT 的增长主要源于细模态气溶胶的吸湿凝结增长。杨溯等 (2011) 通过分析北京、香河、兴隆和太湖四个测站 1 年的气溶胶 Angstrom 指数 (α)、粒子谱分布、AOT 与波长的二次拟合参数 (二次项系数 α_2 , 一次项系数 α_1), 尝试联合 α , α_2 和 α_1 来判断气溶胶粒子的粗、细模态及其贡献。

一些学者结合 CE-318 气溶胶观测资料和辐射传输模式, 对气溶胶的区域辐射强迫做了研究 (Chen et al., 2007)。Xia et al. (2007a) 整编了北京地区的气溶胶历史观测资料 (1980~2000 年, 不连续观测) 和 AERONET 气溶胶资料 (2002~2005 年), 并结合辐射传输模式计算了北京地区的气溶胶直接辐射强迫。结果显示: 北京地区 1980 年的秋季平均 AOT (550 nm) 为 0.28, 到 2005 年增至 0.68; 气溶胶导致地面接收的净太阳辐射在 1 月减少了 17.2 W/m^2 , 6 月减少了 63.5 W/m^2 。Li et al. (2007a)、Xia et al. (2007b) 分析了香河站的气溶胶光学特性, 并联合同期辐射资料、全天空成像仪资料和 CERES 卫星资料给出香河地区地表气溶胶直接辐射强迫年均值达 -25 W/m^2 。Xia et al. (2007c), Liu et al. (2012)

利用太湖地区的 AERONET 资料研究了长江三角洲地区的气溶胶直接辐射强迫, 气溶胶使得到达地面的直射和散射太阳辐射分别减少了 109.2 ± 49.4 和 $66.8 \pm 33.3 \text{ W/m}^2$ 。Che et al. (2009c) 利用陕西榆林站 2011~2012 年的 AERONET 气溶胶资料, 计算了当地气溶胶直接辐射强迫的季节变化。

除了 AERONET 和 CAeroNet 气溶胶地基观测网络外, 国内学者还在我国不同地区 (高原、林区、沙漠、沿海、城市、农村和郊区) 建立了手持光度计气溶胶观测网 CSHNET (Chinese Sun Hazemeter NETwork)。Xin et al. (2007, 2011) 根据 2004 年 8 月~2005 年 9 月的手持光度计观测资料, 分析了我国不同区域的 AOT 和 Angstrom 指数, 结果显示: 青藏高原 AOT 最小, 平均 AOT 约 0.15; 其次是东北的偏远地区, AOT 的变化范围是 0.19~0.21, Angstrom 指数最大 (1.16~1.79)。Wang et al. (2011b) 利用 2004 年 8 月~2007 年 8 月 CSHNET 气溶胶资料和气象资料分析了我国不同生态地区气溶胶的季节变化, 结果显示: 大部分测站的 AOT 在春夏达到最大, 而在秋冬降到最小。青藏高原、东北的偏远地区、北部林区和海南岛大气相对洁净, AOT (0.10~0.20) 最小; 黄土高原地区 AOT 约为 0.36; 中东部

和东南沿海地区由于高密度的工业和农业活动, 气溶胶含量高, 年平均 AOT 变化范围 0.50~0.80。

3.1.2 全波段太阳直接总辐射遥感反演

考虑到我国许多气象台站只有全波段或宽波段的太阳辐射的长期观测资料, 邱金桓(1995)在分析地面晴天全波段太阳直接辐射对 AOT 及谱分布敏感性的基础上, 提出了一个从该辐射信息反演 AOT 的方法及相应计算模式。基于该方法从气象台站辐射观测资料反演得到北京、沈阳等 10 站 1980~1994 年间晴天 AOT, 获得了这些地方 AOT 变化气候学特征(邱金桓等, 1997)。李放和吕达仁(1996)对 1977~1985 年北京地区宽带太阳直接辐射资料进行了分析, 根据实时大气浑浊度记录进行能见度分类, 水汽影响采用实测值进行扣除, 得到各能见度下 AOT 谱。联合 PIS 太阳光谱仪从 1993 年 3 月~1995 年 3 月获得的大气光学特性观测资料和能见度记录, 得到北京地区较为长期的气溶胶光学特性。研究表明: (1) AOT 从上世纪 70 年代到 90 年代有逐年增高的趋势; (2) 能见度分级后, 同一能见度下 AOT 各季节之间的差别大为减小, 地面能见度对整层光学厚度表现出了强约束作用。邱金桓和杨理权(2002)和许潇锋等(2009)发展了从宽带水平面直接辐射日曝辐量反演 AOT 的方法, 并提出基于气溶胶标高的云影响甄别方法。通过与 AERONET 气溶胶产品对比, 验证了该方法的可靠性和有效性。罗云峰等(2000, 2002)利用我国北京等地 47 个甲种日射站 1961~1990 年逐日太阳直接辐射日总量和日照时数等资料, 反演了这 47 个站 30 年 AOT (750 nm), 表明 1961~1990 年间我国 AOT 总体呈明显增加趋势, 其中西南地区东部、长江中下游地区及青藏高原主体, 气溶胶增加最为明显; 华北地区、山东半岛、青海东部和广东沿海, 气溶胶增加也较明显; 西北地区和东北地区大部气溶胶增加相对较小; 而新疆西部与云南部分地区气溶胶有所减小。所选的 47 个站中, 四川盆地成都、重庆和南充 3 站 AOT 最大, 云南景洪站 AOT 最小。

王栋梁和邱金桓(1988), 应用太阳漫射一直射比方法遥感了塔克拉玛干沙漠地区和北京沙尘暴期间气溶胶的复折射指数虚部。尉东胶和邱金桓(1998, 2000)提出了从宽谱太阳漫射辐射信息反演气溶胶复折射指数虚部的的方法, 并基于北京 1992 年辐射观测资料计算了气溶胶复折射指数虚部, 分析了该地区气溶胶辐射气候效应。Zhao and Li

(2007) 提出用太阳光谱直接辐射强度或 AOT 联合向下宽带辐射通量反演气溶胶单次散射反照率的方法, 反演获得香河站 2004 年 9 月~2005 年 8 月的气溶胶单次散射反照率, 将反演结果与 AERONET 的反演产品做了比较检验, 表明该方法可获得比较可靠的反演结果。

3.1.3 浊度计和黑碳仪观测气溶胶辐射特性

气溶胶单次散射反照率可通过测量气溶胶的散射系数和吸收系数来计算, 也可通过各种遥感方法来反演。但相对于遥感方法而言, 测量气溶胶的散射和吸收系数是一种较为直接的方法, 而且常用于遥感反演结果的验证(毛节泰和李成才, 2005)。积分浊度计(Nephelometer)是一种能直接测量气溶胶散射系数的仪器, 目前国内使用较多的积分浊度计主要有: (1) 美国生产的 TSI 3563 积分浊度计, 能直接探测三波长(450, 550 和 700 nm)气溶胶粒子散射特性的高精度仪器, 可实现全天候连续自动观测, 不破坏气溶胶的组分; (2) 澳大利亚 ECOTECH 公司生产的 M9003 系列浊度计, 可获得 525 nm 的气溶胶散射系数; (3) 美国 Radiance Research 公司生产的 M903 浊度计, 中心波长为 530 nm。

胡波等(2003)利用 2002 年 1 月 31 日~2 月 2 日 TSI 3563 浊度计资料和 PM_{10} 观测资料对冬季兰州市西固区大气气溶胶粒子散射特征及其与空气污染的关系进行了研究。21 世纪初, 中国气象局批量引进 M9003 系列浊度计安装在各沙尘暴监测站点, 应用积分浊度计进行气溶胶光学性质的监测(柯宗建等, 2004)。利用沙尘暴监测网联网观测的 M9003 浊度计观测资料、 PM_{10} 质量浓度、能见度和常规气象资料, 分别比较系统地分析了塔克拉玛干沙漠腹地塔中站(杨莲梅等, 2006; 陆辉等, 2010), 张北站和民勤站(延昊等, 2008), 锡林浩特站(章秋英等, 2008)地面气溶胶变化特征及其与气象条件关系, 表明散射系数能很好地反映沙尘天气的强度; 它与 PM_{10} 质量浓度变化规律基本一致, 两者之间具有很好的相关性。此外也在我国东部城市地区开展类似分析研究, 如在北京(柯宗建等, 2004), 上海浦东(许建明等, 2010)等以及在临安、上甸子等本底站(Xu et al., 2002; 柯宗建和汤洁, 2007; 苏晨等, 2009; 赵秀娟等, 2011)。北京地区还开展了气溶胶散射系数吸湿增长特性及散射系数对能见度的影响研究(宋宇等, 2003; 颜鹏等, 2008)。

测量吸收系数的常用方法有：(1) 采样法：把一定空气体积的粒子收集在滤膜上，通过光学方法测量，确定其吸收系数。此方法会改变气溶胶的自然悬浮状态并带来一些误差。(2) 间接测量法：根据仪器测量粒子谱分布并通过 Mie 理论反演计算粒子吸收系数。由于粒子谱分布及理论上的不确定性，所以会产生误差。(3) 光声法 (Spectrophone)：当一重复频率在声波范围的光脉冲通过气溶胶时，粒子吸收光能并通过能量释放加热空气，导致空气膨胀，产生一声波，测出声波的振幅便可得到粒子的吸收量。目前，光声法是测量气溶胶吸收系数的标准方法，常用于其他仪器的校验工作。

20 世纪 80 年代，栾胜基和毛节泰 (1986) 利用毛玻璃积分法直接测量了 1983 年 1 月~1984 年 4 月北京中关村地区气溶胶的吸收系数，并配合光度计测量的大气消光系数估计了该地区气溶胶单次散射反照率和复折射指数虚部，得到该地采暖期气溶胶吸收系数为 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ ，在非采暖期为 10^{-4} m^{-1} ，SSA 变化范围为 0.76~0.94，复折射指数虚部变化范围为 0.006~0.035。胡欢陵等 (1991) 同样利用毛玻璃积分法测量了 1984~1988 年期间中国东部城市、皖南农村、黄山山顶、南海等非城市地区的气溶胶吸收系数，并根据 Mie 理论计算了气溶胶复折射指数虚部。王庚辰等 (1998, 2002) 于 1992 年 9~10 月、1996~2001 年在北京对黑碳气溶胶的浓度进行了观测和分析，北京冬季大气中黑碳粒子的背景浓度约为 $1.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。黄世鸿等 (2000) 采用粒子采样法对中国 23 个地区边界层气溶胶的吸收系数做了观测，发现中国地区边界层气溶胶的吸收系数在 $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 之间，明显呈现北高南低的趋势，四川盆地和贵州有一相对较高的中心。Cao et al. (2003) 对香港和珠江三角洲地区的 2002 年冬季碳气溶胶进行了观测，得出了有机碳和元素碳在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度分布特征。这些研究工作对于气溶胶吸收性质的研究提供了重要的资料。

由于气溶胶中的主要光学吸收性物质是碳，所以气溶胶的光学吸收测量方法，在某种程度上也可以说是基于元素碳光学吸收特性的测量技术。利用黑碳光学性质进行测量的仪器常用的有颗粒物烟雾吸收光度计 (PSAP, Particle/Soot Absorption Photometer) 和黑碳仪。黑碳仪又分为单波段黑碳仪、宽波段黑碳仪以及多波段黑碳仪。单波段黑碳

仪 (如 AE-16 型黑碳仪) 选择 880 nm 波段的光测量黑碳的消光，因为 880nm 波段的红外光最稳定；宽波段黑碳仪 (如 AE-10 型) 利用黑碳特有的宽波段吸收能力，不区分波段，测量黑碳各波段综合消光；而多波段黑碳仪 (如 AE-31 型) 考虑了石墨碳质对不同波段光有不同的吸收作用，在一个周期内，依次用 370, 470, 520, 590, 660, 880 和 950 nm 七个波段的光照射气溶胶样品，测量气溶胶样品对七个波段光的消光作用 (柯宗建, 2004)。

全国多地也开展了用黑碳仪分析气溶胶吸收特性的工作。汤洁等 (1999)，秦世广 (2001)，朱厚玲 (2003) 利用 AE-10 和 AE-14U 型宽波段黑碳仪在四川温江、北京上甸子、浙江临安和西藏拉萨等地进行了黑碳气溶胶的观测研究，其结果基本代表了我国东南、西南、西北、华北和青藏高原不同环境背景下黑碳气溶胶的本底变化特征。李杨等 (2005)，朱崇抒等 (2006) 研究了西安 2003~2004 年大气中黑碳气溶胶的演化特征，分析了黑碳气溶胶中有机碳和元素碳的理化特征和来源。姜淑娟等 (2005) 利用两台黑碳仪在北京大学 2003 年 7~8 月、2003 年 11 月~2004 年 1 月的观测资料，研究了北京北部城区不同尺度气溶胶中的黑碳含量。伍德侠等 (2006) 用黑碳仪对 2005 年夏季北京南部城区 (丰台) 的黑碳气溶胶进行了观测研究。潘小乐等 (2010) 利用黑碳仪观测资料，结合北京城区环保控制措施和气象资料，分析了 2008 年北京奥运会前后和奥运会期间黑碳气溶胶浓度变化的主要影响因子。此外，西宁 (赵玉成等, 2008)、上海 (杨溯等, 2008；肖秀珠等, 2011)、珠江三角洲 (陶俊等, 2008；孙杰等, 2012)、长春 (高枫亭等, 2009)、鞍山 (王绪鑫等, 2010)、天津 (蔡子颖等, 2011)、兰州 (陈霖等, 2012) 等城市也开展了黑碳气溶胶的观测研究工作。除了上述城市地区，章秋英等 (2009)，陆辉等 (2011) 还分别对锡林浩特和塔中地区的黑碳气溶胶进行了观测分析。

积分光度计和黑碳仪配合可对气溶胶的散射系数和吸收系数进行有效的监测，从而得到气溶胶单次散射反照率的信息。柯宗建 (2004) 分析了临安、上甸子本底站及北京观象台的气溶胶散射系数和吸收系数的变化特征，讨论了局地风对气溶胶吸收系数和散射系数的影响，计算了临安和上甸子地区的 SSA，并与国内外的观测结果进行比较。刘新

罡等(2006)通过对广州 2004 年 10 月 1 日~11 月 5 日污染性气体 NO_2 、气溶胶散射系数和吸收系数以及粒子化学成分组成等观测资料的分析,得到了影响广州市大气能见度因子的贡献比例:气溶胶散射为 75.3%、气溶胶吸收为 12.9%、水汽为 5.8%、气体吸收为 3.7%、大气分子散射为 2.4%;给出了不同粒径段气溶胶对散射的贡献比例。李学彬等(2008)根据黑碳仪和浊度计测量的气溶胶吸收系数和散射系数以及光学粒子计数器测量的粒子谱分布,采用 Mie 散射理论反演气溶胶复折射指数,利用此方法对厦门地区 2006 年 12 月的观测数据进行了气溶胶复折射指数的反演实验。吴兑等(2009)对广州番禺大气成分站 2004~2007 年黑碳仪观测的黑碳浓度与吸收系数、浊度计观测的散射系数及导出的 SSA 进行了分析讨论。指出 4 年来当地的黑碳浓度逐年下降,每年年均值下降 $1 \mu\text{g m}^{-3}$ 左右;使用 3 台黑碳仪,分别同步观测 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 中的黑碳,结果表明黑碳气溶胶主要存在于细粒子中;珠江三角洲地区高浓度黑碳与低 SSA 过程可能与来自珠江三角洲周边香港、深圳、东莞等地的输送有关。颜鹏等(2010)分析了 2004 年 9~12 月京津地区 4 次雾霾天气过程时北京上甸子站观测的大气气溶胶光学特性,发现 4 次雾霾影响时段,平均气溶胶散射系数、吸收系数和 SSA 都远高于雾霾过后清洁时段的数值,表明雾霾天气有利于气溶胶的累积和生成。相比于光吸收性气溶胶,雾霾天气对光散射性气溶胶的增加更为有利,反映了二次气溶胶的产生及其对消光的贡献可能有较大增加。Fan et al. (2010)利用 2008 年 5~12 月 ARM/AMF 在寿县的 AOS (Aerosol Observation System, 包括 PSAP 观测的气溶胶吸收系数、TSI 3563 观测的气溶胶散射系数)观测资料,分析了当地气溶胶散射和吸收特性的变化及其与气象要素的关系,寿县的 SSA 约为 0.92,略高于珠江三角洲、长江三角洲和我国北方地区的观测结果。表 1 给出我国不同地区开展气溶胶辐射特性观测实验获得的气溶胶散射系数 (σ_{sp})、吸收系数 (σ_{ap}) 和单次散射反照率 (ω_0)。可以看出,关于气溶胶吸收特性的观测实验所用仪器还不统一,实验开展时间短(只有个别实验跨年度连续观测)。但这些观测事实也为研究我国不同区域(华北城郊、西北沙漠边缘、华南城郊、华东沿海、华中)气溶胶吸收特性提供了宝贵的资料基础。

3.1.4 地基激光雷达探测

激光雷达作为一种主动遥感技术,是探测气溶胶光学特性时空分布的有效手段。1966 年,中国科学院大气物理研究所与中国科学院上海精密光学机械研究所共同研制成功了我国第一台激光雷达,并开展了一系列激光探测气溶胶光学特性及其反演方法的研究(邱金桓等, 2003a)。

吕达仁等(1976)利用红宝石激光雷达并配合太阳光衰减测量对北京地区晴空低层 3 km 以下的大气消光系数分布及光学厚度作了定量测量和分类分析。结果表明:北京地区气溶胶消光系数分布与 Elterman 模式有较大的区别,消光系数分布与光学厚度值具有明显季节性,同时受近地逆温层结生消的强烈影响。

我国早期大力开展的另两类激光大气遥感研究是探测烟囱排放的烟羽浓度时空分布和探测斜视与水平能见度。孙景群(1986)不仅进行激光探测烟羽浓度时空分布的研究,还应用激光探测结果研究烟羽粒子的污染扩散规律。吕达仁等(1976)、赵燕曾等(1980)和邱金桓等(1988a)先后应用激光雷达探测近地面气溶胶消光系数分布,并从该分布确定斜视与水平能见度。

1998 年,中国科学院安徽光学精密机械研究所研制成功一台双波长(532 nm 和 1064 nm)激光雷达 L300。周军等(2000)介绍了该激光雷达的技术参数和总体结构,并给出合肥地区对流层气溶胶测量的若干典型结果。随后,该所又研制了多种 Mie 散射激光雷达并用于实际探测,包括 AML-1 车载测污激光雷达(张改霞等, 2004a, 2004b), Raman-Mie 散射激光雷达(谢晨波等, 2006; 伯广宇等, 2010; 吴德成等, 2011)及体积较小的便携式激光雷达(钟志庆等, 2003), 积累了合肥地区不同大气条件下气溶胶水平消光系数和消光系数垂直分布的探测资料。

邱金桓等(1988b)综合激光雷达和太阳光度计的探测资料,分析了 1983 年冬季北京的 AOT、气溶胶谱分布、复折射指数及粒子浓度的高度分布等特性。邱金桓等(2003b)基于自行研制的三波长激光雷达开展了对流层气溶胶的探测实验,并重点分析了北京 2000 年 1~4 月对流层上部气溶胶在 532 nm 波长的消光系数分布特征。苏州大学的研究人员利用自行研制的 1060 nm Mie 散射激光雷达,重点分析了 2004 年苏州上空对流层气溶胶的垂直

表 1 我国不同地区气溶胶散射系数 (σ_{sp})、吸收系数 (σ_{ap}) 和单次散射反照率 (ω_0) 的比较
Table 1 Aerosol scattering coefficients (σ_{sp}), absorption coefficients (σ_{ap}), and single scattering albedo (ω_0) values observed in different parts of China

观测地点	观测时间	波长 (nm)	σ_{sp} (Mm^{-1})	σ_{ap} (Mm^{-1})	ω_0	观测仪器	文献
北京 (北京大学校园) (39.99°N, 116.31°E)	1999-06-11~06-16	$\lambda_1=530$, $\lambda_2=565$	488 ± 370	83 ± 40	0.84 ± 0.08	M903, PSAP	Bergin et al. (2001)
北京 (城区) (39.93°N, 116.33°E)	2006-03-18~04-19	$\lambda_1=525$, $\lambda_2=532$	278 ± 248	33 ± 29	0.87 ± 0.05	M9003, AE-31	潘小乐 (2007)
上甸子 (北京远郊) (40.64°N, 117.09°E)	2003-04~2005-01	$\lambda_1=525$, $\lambda_2=532$	175 ± 189	18 ± 13	0.88 ± 0.05	M9003, AE-31	颜鹏 (2006)
河北香河 (39.80°N, 116.96°E)	2005-03	$\lambda_1=550$, $\lambda_2=550$	468 ± 472	65 ± 75	$0.81 \sim 0.85$	TSI 3563, PSAP	Li et al. (2007)
天津宝坻 (乡村) (39.73°N, 117.28°E)	2006-04-24~05-16	$\lambda_1=525$, $\lambda_2=532$	302 ± 172	62 ± 40	0.83 ± 0.06	M9003, AE-31	潘小乐 (2007)
陕西榆林 (38.33°N, 109.72°E)	2001-03-30~05-01	$\lambda_1=530$, $\lambda_2=565$	158 ± 193	6 ± 11	0.95 ± 0.05	M903, PSAP	Xu et al. (2004)
广州 (23.13°N, 113.26°E)	2004-10-04~11-05	$\lambda_1=530$, $\lambda_2=565$	463 ± 178	92 ± 62	0.84 ± 0.05	M903, PSAP	Andreae et al. (2008)
广州番禺 (23.00°N, 113.35°E)	σ_{sp} : 2004-02-08~ 2007-12-31 σ_{ap} : 2004-01-01~ 2007-12-31	$\lambda_1=525$, $\lambda_2=532$	358 ± 107	82 ± 23	0.81 ± 0.04	M9003, AE-31	吴兑等 (2009)
新垦 (广州郊区) (22.60°N, 113.60°E)	2004-10-04~11-05	$\lambda_1=550$, $\lambda_2=550$	333 ± 138	70 ± 42	0.83 ± 0.05	TSI 3563, MAAP	Cheng et al. (2008)
浙江临安 (30.28°N, 119.75°E)	1999-11	$\lambda_1=530$, $\lambda_2=565$	353 ± 202	23 ± 14	0.93 ± 0.04	M903, PSAP	Xu et al. (2002)
浙江临安 (30.28°N, 119.75°E)	2003-07~2005-06	$\lambda_1=525$, $\lambda_2=532$	242 ± 134	45 ± 22	0.82 ± 0.04	M9003, AE-31	颜鹏 (2006)
安徽寿县 (32.56°N, 116.78°E)	2008-05~12	$\lambda_1=550$, $\lambda_2=550$	401 ± 314	29 ± 31	0.92 ± 0.03	TSI 3563, PSAP	Fan et al. (2010)

注: λ_1 是气溶胶散射系数 σ_{sp} 的观测波长, λ_2 是气溶胶吸收系数 σ_{ap} 的观测波长。

消光特性 (杨昭, 2004; 丁红星, 2004; 李洪敬, 2005)。中国海洋大学海洋遥感研究所的学者研制了国内首台基于碘吸收滤波器的高光谱分辨率激光雷达系统 (刘金涛等, 2003; 宋小全等, 2008), 相比于对激光雷达比的约束或对大气均匀性的要求, 该系统可以直接测量出气溶胶后向散射比, 进而可通过消除大气分子的影响得到气溶胶后向散射系数; 2000~2007 年利用该系统在青岛某机场、中国海洋大学鱼山校区、青岛市小麦岛海滨等地进行了观测实验。武汉大学张金业 (2010) 用自行研制的 Rama-Mie 多通道激光雷达系统, 对武汉地区大气气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比等的垂直分布进行了实时探测。

白宇波等 (2000) 与日本学者合作在西藏拉萨开展了激光雷达遥感对流层与平流层气溶胶消光

系数和退偏比分布的实验研究, 并与日本名古屋地区的激光探测结果作了比较。黄忠伟 (2012) 用兰州大学半干旱气候与环境观测站 (SACOL) 多套地基激光雷达系统, 自 2007 年来在我国西北地区五个站点的野外观测资料, 重点分析了该地区气溶胶物理学特性的时空分布变化特征及差异, 并与东亚激光雷达观测网 AD-NET 在日本筑波的激光雷达观测结果对比分析。

激光雷达探测平流层气溶胶方面, 孙金辉等 (1986) 应用一台 694 nm 波长激光雷达探测平流层气溶胶。1991 年皮纳图博 (Pinatubo) 火山爆发后在北京连续进行了约三年的激光探测平流层气溶胶的实验研究, 探测结果表明: 受皮纳图博火山爆发的影响, 1991 年 7 月下旬开始, 北京地区对流层上部和平流层气溶胶粒子的浓度有非常明显的

增加；在 1991 年 10 月，10~26 km 高度范围内，气溶胶粒子的浓度比常态约增大 2 个数量级（孙金辉等，1993）。孙金辉等（1995）还在中国南极中山站用激光雷达探测平流层气溶胶。探测结果表明：受皮纳图博火山爆发的影响，1993 年南极地区平流层气溶胶粒子含量比 1990 年明显增加，证实了南极冬季平流层云的存在。余长明和易帆（2004）采用武汉大学双波长激光雷达工作于 589 nm 波长的观测数据，分析了 2001 年 3 月~2002 年 1 月间武汉上空平流层气溶胶的消光系数和积分体后向散射系数等光学特性。结果表明：武汉上空 16~20 km 间存在一气溶胶层，其厚度及散射峰值随季节有一定变化，积分体散射系数夏季大冬季小。

激光雷达探测沙尘天气方面，邱金桓等（1984）于 1982 年 5 月用激光雷达遥感了沙尘暴粒子的消光系数垂直分布特性，探测结果表明：沙尘暴发生时，2 km 高度范围内 AOT 与消光系数有一个量级的变化。邱金桓和孙金辉（1994），Qiu and Yang（1999）还应用激光雷达和光度计综合探测了 1988 年 4 月北京地区三次沙尘暴过程中大气气溶胶光学特性及其远距离输送时的垂直结构。刘东等（2003）用 L300 偏振激光雷达监测 2001 年 4 月 11 日和 4 月 14 日合肥地区的两次沙尘天气过程，沙尘气溶胶后向散射退偏振比的探测结果表明：合肥西郊上空沙尘气溶胶的退偏振比在 0.2~0.3，但是剧烈沙尘暴的气溶胶退偏振比可达到 0.4。董旭辉等（2007）用日本国立环境研究所（NIES）研制的双波长（532 和 1064 nm）偏振激光雷达观测的后向散射系数、退偏比和双波长信号比等对沙尘天气的气溶胶特征进行解析，并对垂直方向沙尘浓度的分布进行了计算。研究表明：退偏振比 > 0.1 时，双波长信号比 > 0.4，即可判断为沙尘天气。张怀清等（2007）用 LB10-D200 激光雷达，对 2006 年 4 月北京地区天气连续监测，研究了沙尘天气的大气垂直结构及其发展。研究结果表明：沙尘层 AOT 对整个大气 AOT 的贡献率约为 60%~80%。周碧等（2011）用 2007 年 1~4 月兰州大学半干旱气候与环境观测站激光雷达资料，反演了晴空无云日和沙尘过程大气气溶胶消光系数和光学厚度。结果表明，兰州远郊榆中地区沙尘天气时 6 km 以下气溶胶消光系数较大，为 $0.1\sim 1\text{ km}^{-1}$ ；AOT 最大时可达 3.5。李崇（2011）用安徽光机所研制的 AML-3 车载测污激光雷达系统在沙尘天气的观测资料，反

演计算沙尘天气期间合肥地区的气溶胶消光系数垂直廓线和 AOT，分析发现：沙尘天气过境前后，气溶胶的垂直分布有明显的差别。源于西北地区的沙尘天气一般在合肥上空 3~6 km 高度出现浓度很高的沙尘气溶胶层；源于合肥局地区域的沙尘天气，则在近地面 0~3 km 处形成较高浓度的沙尘气溶胶层。

Spinhirne（1993）提出微脉冲激光雷达（Micro Pulse Lidar, MPL）的概念，其与普通激光雷达相比，有以下几个优点：1）连续工作时间长，MPL 采用固态二极管激光器，使其工作寿命远超过普通激光雷达，一年只需进行两次维护即可保持长时间运行；2）脉冲能量低，出射脉冲能量相对于普通激光雷达的 0.1~1.0 焦耳降到几个微焦，对人眼安全，可提高监视仪器运转的安全性，确保系统的稳定性，还使仪器的自动运行成功实现；3）脉冲重复频率高，相对于普通激光雷达的几十赫兹（Hz）它的脉冲频率达到几千赫兹，而脉冲宽度达到几十到几百纳秒，使得空间分辨能力达到几十米的精度（李成才等，2004）。由于 MPL 的这些优点，它被广泛用于气溶胶和云的移动观测。目前正在运行的全球微脉冲激光雷达网（MPLNET）由 20 多台 MPL 组成，是美国国家宇航局（NASA）的全球观测系统（EOS）计划资助的一个项目（<http://mplnet.gsfc.nasa.gov/>）用于监测气溶胶和云的垂直分布信息，也为卫星遥感提供气溶胶观测的校验。

安徽光机所于 2001 年研制成功了微脉冲激光雷达 MPL-A1，具备了昼夜长时间连续运行能力（徐赤东和纪玉峰，2008）。中国海洋大学于 2004 年研制成功了微脉冲激光雷达，并取得了测量结果（张园明，2009）。

李成才等（2004）利用 MODIS 可见光通道 AOT 资料和 MPL 523 nm 气溶胶消光系数垂直分布观测资料，分析了珠江三角洲地区 2003 年 6 月一次气溶胶污染过程中 AOT 的分布特征、气溶胶消光系数廓线的演变，表明该污染过程是弱高压控制下的区域性污染，香港地区污染物浓度的上升与区域性输送有直接关系。刘诚等（2006）利用 MPL 对 2004 年夏季西藏那曲和北京郊区对流层大气气溶胶的光学特性进行了测量和分析，给出两地气溶胶消光系数的垂直分布及那曲的大气边界层高度。Huang et al.（2008a）利用 MPL 观测资料，结合太阳光度计观测，分析了黄土高原上空气溶胶的垂直

分布特征。中国海洋大学海洋遥感研究所还开展了 MPL 的飞行试验, MPL 装载在 CMS-3807 飞机上, 在青岛周边海域进行了飞行探测。张园明和刘智深(2009)介绍了该机载 MPL 及其数据处理方法, 将 MPL 计算的 AOT 与 MODIS 的 AOT 进行比较。

杨晓武(2009)用上海市浦东区气象局的 MPL 资料反演得到气溶胶消光系数廓线, 分析了消光系数的变化特征及与某些气象要素关系。毛晓琴(2010), 潘鹄(2010)利用上海 MPL 观测资料研究了边界层对灰霾天气的影响, 发现边界层的高度与气溶胶的垂直扩散有着密切的关系, 边界层低时气溶胶在底层积聚会导致污染加剧。丁辉(2012)基于安徽寿县地区 2008 年 5 月 14 日~12 月 28 日晴天无云条件下的 MPL 观测资料, 结合无线电探空资料对寿县地区气溶胶消光系数廓线垂直分布特征以及混合层高度的演变特征做了研究。

激光雷达方程有两个未知数导致反演算法的不稳定, 这是激光探测反演气溶胶光学特性的一个难题, 另一难题是激光多次散射效应。国内许多学者多年来致力于反演方法与激光多次散射问题的研究(邱金桓等, 2003a)。在激光雷达方程反演算法研究方面, 中国科学院大气物理研究所的学者发展了多个反演算法。吕达仁等(1977)在一次散射的条件下导出了激光雷达方程的一个解析解。周诗健等(1981)进行了对流层大气消光系数几种激光探测方法的比较。邱金桓等(1988a)发展了一个约束求解方法, 一个双波长激光反演方法, 一个空间激光雷达方程反演方法, 发现分子散射引起的激光雷达方程求解的不稳定性。吕达仁(1982)发展了一个考虑二次散射的激光雷达近似方程, 并分析了该方程的一些普遍特性。邱金桓等(1992), 邱金桓和吕达仁(1992)发展了一个参数化的多次散射激光雷达方程, 在该模式中首次引入了四个表征多次散射特性的因子, 即几何消光因子、消光分布因子、前向散射因子和后向散射因子。该模式不仅适合于研究多次散射对激光回波信号和激光大气遥感的效应, 而且对于考虑多次散射的激光大气探测, 是一个较合适的应用模式。Yang et al. (1986)从理论上研究了利用多波段激光雷达反演气溶胶粒子谱和复折射指数的方法。

此外, 胡顺星等(2006)介绍了一种激光雷达常数标定和 AOT 测量的新方法。利用太阳辐射计

获得 AOT, 激光雷达可以获得 35、40 km 高度的回波信号, 在这一高度区间忽略气溶胶, 大气模式提供大气分子散射系数, 根据激光雷达方程计算出激光雷达常数。接着, 以激光雷达 35、40 km 的大气分子后向散射回波信号来确定 AOT。陈涛等(2010)从 Mie 散射激光雷达方程出发, 得到边界值与激光雷达距离平方校正回波信号之间的等式关系, 利用迭代法在低层大气中找到一个比较准确的后向散射系数的边界值, 将该方法应用于实际激光雷达回波信号反演中, 得到低层大气中气溶胶后向散射系数廓线, 并与在对流层顶选取边界值反演得到气溶胶后向散射系数廓线进行比较。结果表明: 提出的方法在低层大气中确定的后向散射系数边界值, 可以较好地反演出低层大气中气溶胶后向散射系数廓线。

在大气气溶胶及其辐射特性参数垂直分布探测方面, 中国科学院大气物理研究所和国内其他单位还利用有人和无人驾驶飞机以及系留气艇携带仪器, 开展了一些测量研究。这里不予一一综述。

3.2 卫星遥感气溶胶

地基遥感气溶胶虽然可以获得较为准确的气溶胶信息, 但是目前这种方法还不能用来遥感大范围的气溶胶光学特性。卫星遥感克服了地基探测方法的这些不足, 特别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示出它的优势(李正强和赵风生, 2001; 毛节泰等, 2002b)。随着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, 卫星遥感已成为气溶胶研究不可替代的有效手段。

3.2.1 卫星获取气溶胶光学特性

国际上开展卫星资料遥感气溶胶的工作始于 20 世纪 70 年代, 我国科学家于 80 年代开始进行了这方面的研究。赵柏林和余小鼎(1986)用 NOAA AVHRR 资料, 对渤海上空进行了单点的气溶胶卫星遥感研究。Zhou et al. (1994) 用 NOAA AVHRR 资料分析了 1993 年 4 月北京、天津上空的沙尘暴特性。刘广员和孙毅义(1997, 1998)用 NOAA AVHRR 可见光单通道资料反演了晴空太平洋海域的气象能见度和 AOT, 并研究了 NOAA AVHRR 双通道反演 AOT 的方法。

卫星接收到的辐射来源于地球大气的散射以及地表反射的复杂相互影响, 卫星遥感陆地气溶胶长期以来存在地表反射率和气溶胶光学特征两方

面同时未知的难题。因此,国内学者致力于探索一种从空间综合遥感地表反射率和 AOT 的方法。Qiu (1998) 提出卫星综合遥感 AOT 和植被反射率的一个反演方法。吕达仁等 (1998) 进行了卫星同时遥感大气 AOT 与地表反射率的原理和数值试验研究。Qiu and Nobuo (2001) 还研究了气溶胶光学特性的垂直分布特性对卫星遥感的影响。

NASA 发射的 Terra 和 Aqua 卫星搭载的 MODIS 传感器具有 36 个通道,覆盖了紫外、可见、近红外、红外等通道,为反演气溶胶和地表特征提供了丰富的信息。NASA 的 MODIS Level 2 气溶胶算法中,首先进行蓝光 470 nm 和红光 660 nm 通道地表反射率的确定,然后选择出 10%~40% 低地表反射率的像素点进行反演并取平均,作为 10 km×10 km 的代表值。在气溶胶模型的选取上,对于非沙尘型气溶胶,采用按地域和季节来确定气溶胶模型的方法,中国东部和南部,在非沙尘情况下,取为工业城市型气溶胶 (Kaufman et al., 1997)。国内开展了大量验证 MODIS 气溶胶产品在中国不同区域适用性的工作 (毛节泰等, 2002a; 李成才等, 2003; 朱爱华等, 2004; Xia et al., 2004; 夏祥鳌, 2006; Li et al., 2007b; Mi et al., 2007; 王莉莉等, 2007; 李晓静等, 2009; 张莹和孙照渤, 2010); MODIS AOT 产品也被广泛运用于气溶胶特性和辐射强迫、大尺度污染输送、沙尘气溶胶特性、区域空气质量监测等研究中 (宗雪梅, 2006; 段婧和毛节泰, 2007; 王中挺等, 2008; Liu et al., 2010; Li et al., 2009; 何秀等, 2010; Xue et al., 2011; 郑卓云等, 2011); 也有一些针对中国区域的 MODIS 气溶胶算法改进工作 (白鸿涛等, 2010; Li et al., 2012)。

大多数陆地表面反射辐射的偏振分量小且其时空变化也较小,而分子和气溶胶散射辐射强偏振,因此大气顶偏振反射率主要来自大气,在对大气分子信号进行订正后,偏振反射率的测量可用于反演陆地上空的气溶胶。“A-Train”卫星编队中的 PARASOL (Polarization & Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar) 卫星搭载的 POLDER 仪器,实现了地气系统的偏振观测。基于此,国内学者也开展了矢量辐射传输算法及用 POLDER 多光谱、多角度偏振辐射资料遥感反演气溶胶特性的工作。阎邦华 (1997) 做了有关地基天光偏振观测、POLDER 卫星数据整理与分析 and 向量辐射传输模式等基础性

的工作,并结合实测数据和数值模拟,较系统地分析了地气系统中太阳辐射的定量偏振特征和该偏振特征与各种地表、气溶胶光学参数之间的控制关系,提出了一种利用偏振信息同时反演地表和气溶胶参数的新方法。韩志刚 (1999) 将标量辐射传输方程的矩阵指数求解模型推广到矢量情形,以此对倍加累加矢量辐射传输模式 RT3 (Evans and Stephens, 1991) 做了对称倍加和动态 EDI 改进;从植被辐射传输的基本概念出发,导出均匀叶面取向分布、平面平行均匀植被的偏振反射模型;通过对 RT3 改进版、植被偏振反射模型边界条件、气溶胶模型和两层大气模型耦合,形成了气溶胶反演正问题模式系统。利用 POLDER-1/ADEOS-I 偏振通道资料,对位于内蒙古和蒙古的两个草原测点进行了气溶胶反演试验,结果显示模式系统具有同时反演气溶胶有效半径和光学厚度的能力。段民征 (2001) 联合标量辐射和偏振辐射,利用 POLDER-1/ADEOS-I 偏振通道资料,给出我国华北地区的 AOT 和地表反照率的区域分布,并与地基观测资料和其他结果进行了对比验证分析,取得了比较合理的空间分布定量结果。Fan et al. (2008, 2009) 用地面 AERONET 气溶胶资料,对中国北京地区的 POLDER-2 和 PARASOL 气溶胶产品进行了验证,结果显示 POLDER 气溶胶产品可以很好地表征半径小于 0.3 μm 主要来自人类污染排放的细粒子气溶胶贡献;并对北京地区几种典型天气条件下的气溶胶光学特性做了 PARASOL 卫星反演试验及验证分析。孙夏和赵慧洁 (2009) 发展了用反射率和偏振反射率查找表反演气溶胶光学参数和地表反射率的方法,实现了北京、香河和 Dalanzadgad 测站 AOT、粒子半径、复折射指数和地表反射率的反演。王中挺等 (2009) 用单次散射近似方法开展了 PARASOL 多角度偏振数据反演北京地区 AOT 的试验研究,结果表明:多角度偏振方法反演陆地气溶胶精度稳定,受季节和地表类型的影响小,但精度较低还需作进一步的改进。苏小莉 (2010) 用东亚地区 14 个 AERONET 地基测站实现了东亚地区 POLDER-3 陆地气溶胶产品的区域验证,用验证后有质量保证的 POLDER-3 气溶胶产品,分析讨论了东亚地区细模态气溶胶的空间分布及季节变化。Cheng et al. (2011) 发展了用 PARASOL 多角度偏振资料反演 AOT 和细模态比 (Fine Mode Fraction) 的方法,对东亚地区气溶胶做了反演试验,并用 AERONET 地基观测结果做了

比较验证。邵培等(2012)用 POLDER 偏振资料反演了北京市 2005~2010 年的 AOT, 用 AERONET 气溶胶资料对反演结果做了验证, 给出北京地区 AOT 的时空分布。

由于湖面水体的反射率比较小且较均匀, 毛节泰等(2001)提出用地球静止卫星 GMS 在一段时间内的最小表观反射率确定湖面反射率, 再用此湖面反射率来反演得到 AOT 的方法。用该方法从 GMS-5 静止卫星资料遥感了我国大陆 25 个湖面上空的 AOT, 结果显示: 用卫星反演湖面上空的 AOT 可以提供大陆上空气溶胶的信息(张军华等, 2003)。李正强和赵风生(2001)开发了一个用 GMS-5 卫星可见光通道观测资料实时反演 AOT 的应用软件, 用该软件分析了渤海湾地区 AOT 的时空变化。任通等(2011)探讨了用中国风云 FY-2C 静止卫星可见光资料反演 AOT 的方法。通过计算一个月中每日同一时刻平均地表反射率来降低地表反射率估计的随机性, 讨论了该方法中无云晴空大气 AOT 值的不同假设对结果的影响。将 2008 年 5 月由 FY-2C 可见光资料反演得到的 AOT 产品分别与东亚 6 个 AERONET 站点的 AOT 产品及 MODIS AOT 产品进行了比较, 分析了 FY-2C AOT 产品算法的误差来源和降低误差影响以及改善产品质量的方案。高玲等(2012)用日本静止气象卫星 MTSAT 可见光通道资料反演了 2008 年 5 月中国地区陆地上空 AOT, 将得到的结果分别与 AERONET 站点的地面观测值及 MODIS AOT 产品进行比较, 表明 MTSAT 反演结果可以反映 AOT 的日变化信息。此外, 胡秀清等(2003, 2007)和高庆先等(2004)开展了用静止气象卫星(GMS-5)监测沙尘暴的研究工作。

3.2.2 卫星探测气溶胶垂直分布及长距离输送

“A-Train”卫星编队中的 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 卫星于 2006 年 4 月 28 日发射升空, 其搭载了一台正交极化云—气溶胶激光雷达 (CALIOP, Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization), CALIOP 可获得昼夜两次 2 个波长 (532, 1064 nm) 的后向散射系数廓线、532 nm 体积退偏比垂直廓线及两个波长的色比值。Huang et al. (2007, 2008b) 基于 CALIPSO 数据分析表明夏季塔克拉玛干沙尘气溶胶可输送至青藏高原北坡, 导致高原气溶胶光学厚度夏季偏高, Xia et al. (2008b) 基于 MISR 气

溶胶光学厚度数据分析表明青藏高原北坡和塔克拉玛干沙漠地区夏季气溶胶光学厚度年际变化显著相关, 印证了 Huang et al. (2007, 2008b) 的结论。Xia et al. (2011) 基于 CALIPSO 以及纳木错太阳光度计等观测数据分析表明, 南亚地区生物质燃烧和高人为污染排放导致在青藏高原南坡堆积高浓度气溶胶, 在地形和大气环流输送配合下南亚地区人为气溶胶可输送至青藏高原中部地区, 这为 Lau et al. (2006) 提出的气溶胶热泵效应提供了观测基础。张冰(2007)用地基高光谱分辨率激光雷达和星载 CALIPSO 激光雷达对青岛地区的大气消光特性进行探测研究。马盈盈等(2009)分析了 2006 年 6 月 20 日~2007 年 2 月 3 日 CALIPSO 卫星经过中国东南部地区 (17°~31°N, 109°~126°N) 的星载激光雷达数据, 描述了该地区 AOT 随高度的变化及其时空分布特征。陈勇航等(2009)用 CALIOP 观测资料, 分析了 2007 年 3 月 28 日~4 月 2 日由西向东影响我国多个省、市、自治区的一次远程强沙尘污染传输过程, 对后向散射系数、退偏比、色比等光学特性参数进行了研究, 表明 CALIPSO 数据能较好反映强沙尘远程传输过程中沙尘气溶胶光学特性的垂直分布特征及其粒子大小、不规则性随高度的变化特征。申莉莉等(2010)联合气象资料、后向轨迹模拟 (HYSPLIT) 和 CALIOP 观测资料, 分析了 2008 年 5 月 25~29 日影响我国北部地区的沙尘天气过程。结果表明, 此次沙尘天气过程中, 沙尘气溶胶的退偏振比约为 0.10~0.38, 沙尘主要分布在海拔 2~4 km, 最高可达 5 km。此外, CALIOP 数据也广泛运用于城市地区污染事件过程中气溶胶光学和微物理属性的垂直分布特征研究(刘琼等, 2012; 徐婷婷等, 2012)。

理论和观测研究都表明, 强火山爆发送入平流层的气溶胶直接或间接地影响全球气候变化, 陈洪滨等(1994)用 SAGE (Stratospheric Aerosol & Gas Experiment) 卫星探测的气溶胶消光系数 (1020 nm) 资料, 分析了平流层气溶胶在皮纳图博火山爆发前后 (1990~1992 年) 一个较长期的变化特征。

4 小结和展望

本文从地基和卫星观测两大方面详细阐述了我国大气气溶胶辐射特性观测方面的研究进展, 到目前为止, 国内虽然已经进行了大量有关气溶胶特性的观测与研究, 积累了大量有价值的观测资料,

但长期系统连续的观测仍需加强。

除了直接观测和遥感反演获取气溶胶特性外, 数值模式也可以根据已知的物理规律, 得到一些尚无法直接观测到的数据, 包括一些无法观测到的物理量或没有直接观测数据的点位或时段, 而且可以用于估计全球或区域的气溶胶气候效应(毛节泰和李成才, 2005)。气候模式估算的结果与实际观测的差别还很大, 造成差别的原因有多种: 气溶胶特性及含量的时空变化大, 还没有精确的气溶胶模型支持模式计算; 目前模式所用的气溶胶模型对气溶胶化学组分、粒子形状、谱分布、复折射指数、混合状态等信息还采用经验值或做相应的假设, 这增加了准确模拟和预测气候系统对直接辐射强迫响应的困难; 由于气溶胶粒子与云滴凝结核、云滴凝结核与云滴数密度、云滴数密度与云滴有效半径及云的光学特征之间关系的复杂性, 使得气溶胶间接辐射强迫的研究存在更大的困难。

因此需要将直接在线观测、遥感反演观测和数值模式模拟三种途径有机地结合起来, 建立综合的气溶胶观测资料中心, 完善气溶胶观测规范, 做好质量控制, 整合各研究实体获得的气溶胶资料, 才能得到能用于研究气候变化和大气环境问题所需的基础数据。

致谢 感谢兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)提供的 CE-318 气溶胶观测资料。

参考文献 (References)

- Andreae M O, Schmid O, Yang H, et al. 2008. Optical properties and chemical composition of the atmospheric aerosol in urban Guangzhou, China [J]. *Atmos. Environ.*, 42: 6335–6350, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.01.030.
- 白鸿涛, 冯建东, 陈勇航, 等. 2010. 基于 AERONET SACOL 站观测资料的沙尘气溶胶光学厚度卫星反演试验研究 [J]. *光学学报*, 30 (10): 2837–2844. Bai H T, Feng J D, Chen Y H, et al. 2010. Experimental study of satellite retrieval of dust aerosol optical thickness using AERONET SACOL site observations [J]. *Acta Optica Sinica (in Chinese)*, 30 (10): 2837–2844.
- 白宇波, 石广玉, 田村耕一, 等. 2000. 拉萨上空大气气溶胶光学特性的激光雷达探测 [J]. *大气科学*, 24 (4): 559–567. Bai Yubo, Shi Guangyu, Koichi Tamura, et al. 2000. Lidar observations of atmospheric aerosol optical properties over Lhasa [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24 (4): 559–567.
- Bergin M H, Cass G R, Xu J, et al. 2001. Aerosol radiative physical and chemical properties in Beijing during June [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D16): 17969–17980.
- 伯广宇, 谢晨波, 刘东, 等. 2010. 拉曼激光雷达探测合肥地区夏秋季边界层气溶胶的光学性质 [J]. *中国激光*, 37 (10): 2526–2532. Bo Guangyu, Xie Chenbo, Liu Dong, et al. 2010. Optical properties of aerosol in planetary boundary layer measured by Raman lidar at Hefei in summer and autumn [J]. *Chinese Journal of Lasers (in Chinese)*, 37 (10): 2526–2532.
- 蔡子颖, 韩素芹, 黄鹤, 等. 2011. 天津夏季黑碳气溶胶及其吸收特性的观测研究 [J]. *中国环境科学*, 31 (5): 719–723. Cai Ziyang, Han Suqin, Huang He, et al. 2011. Observational study on black carbon aerosols and their absorption properties in summer in Tianjin [J]. *China Environmental Sciences (in Chinese)*, 31 (5): 719–723.
- Cao J J, Lee S C, Ho K F, et al. 2003. Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River Delta Region, China during 2001 winter period [J]. *Atmospheric Environment*, 37: 1451–1460.
- Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. 1992. Climate forcing by anthropogenic aerosols [J]. *Science*, 255: 423–430.
- 车慧正, 张小曳, 石广玉, 等. 2004. 毛乌素沙漠地区大气气溶胶光学特性初步研究 [J]. *过程工程学报*, 4 (Z1): 772–776. Che Huizheng, Zhang Xiaoye, Shi Guangyu, et al. 2004. Elementary researches on aerosol optical characteristics in the Mu Us desert [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering (in Chinese)*, 4 (Z1): 772–776.
- Che H Z, Zhang X Y, Chen H B, et al. 2009a. Instrument calibration and aerosol optical depth validation of the China aerosol remote sensing network [J]. *J. Geophys. Res.*, 114: D03206, doi:10.1029/2008JD011030.
- Che H Z, Yang Z F, Zhang X Y, et al. 2009b. Study on the aerosol optical properties and their relationship with aerosol chemical compositions over three regional background stations in China [J]. *Atmos. Environ.*, 43: 1093–1099, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.11.010.
- Che H Z, Zhang X, Alfraro S, et al. 2009c. Aerosol optical properties and its radiative forcing over Yulin, China in 2001 and 2002 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (3): 564–576.
- 陈洪滨, 吕达仁, 许丽生. 1994. 利用 SAGEII 资料分析皮纳图博火山爆发前后平流层气溶胶的变化特征 [J]. *科学通报*, 39 (22): 2084–2087. Chen Hongbin, Lü Daren, Xu Lisheng. 1994. The analysis of variation of the stratospheric aerosol before and after the Mount Pinatubo volcanic eruption by using SAGE II data [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 39 (22): 2084–2087.
- Chen H B, Xia X G, Wang P C, et al. 2007. Ground-based measurements of aerosol optical properties and radiative forcing in North China [J]. *China Particulogy*, 5: 202–205.
- 陈霖, 张镭, 张磊, 等. 2012. 半干旱地区黑碳气溶胶和含碳气体特征及来源 [J]. *中国环境科学*, 32 (8): 1345–1352. Chen Lin, Zhang Lei, Zhang Lei, et al. 2012. Characteristics of black carbon aerosol and carbonaceous gases and their emission sources in semi-arid region [J]. *China Environmental Sciences (in Chinese)*, 32 (8): 1345–1352.
- 陈涛, 吴德成, 刘博, 等. 2010. 低层大气中确定气溶胶后向散射系数边界值的新方法 [J]. *光学学报*, 30 (6): 1531–1536. Chen Tao, Wu Decheng, Liu Bo, et al. 2010. A new method of determining aerosol backscatter coefficient boundary value in the lower troposphere [J]. *Acta Optica Sinica (in Chinese)*, 30 (6): 1531–1536.
- Cheng T, Gu X, Xie D, et al. 2011. Aerosol optical depth and fine-mode fraction retrieval over East Asia using multi-angular total and polarized remote sensing [J]. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 4: 5689–5716.

- Cheng Y F, Wiedensohler A, Eichler H, et al. 2008. Aerosol optical properties and related chemical apportionment at Xinken in Pearl River Delta of China [J]. *Atmos. Environ.*, 42: 6351–6372, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.02.034.
- 陈勇航, 毛晓琴, 黄建平, 等. 2009. 一次强沙尘输送过程中气溶胶垂直分布特征研究 [J]. *中国环境科学*, 29 (5): 449–454. Chen Yonghang, Mao Xiaojin, Huang Jianping, et al. 2009. Vertical distribution characteristics of aerosol during a long-distance transport of heavy dust pollution [J]. *China Environmental Sciences (in Chinese)*, 29 (5): 449–454.
- Coakley J A Jr, Cess D, Yurevich F B. 1983. The effect of tropospheric aerosol on the earth's radiation budget: A parameterization for climate model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 40 (1): 116–138.
- 丁红星. 2004. 激光雷达对苏州城区对流层气溶胶的观测 [D]. 苏州大学硕士学位论文. Ding Hongxing. 2004. Lidar observations of aerosol in troposphere in Suzhou [D]. M. S. thesis (in Chinese), Suzhou University.
- 丁辉. 2012. 利用微脉冲激光雷达 (MPL) 探测气溶胶消光系数廓线和大气混合层高度的初步研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Ding Hui. 2012. Measurements of aerosol vertical profiles and the mixed layer height using a micro pulse lidar [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 董旭辉, 祁辉, 任立军, 等. 2007. 偏振激光雷达在沙尘暴观测中的数据解析 [J]. *环境科学研究*, 20 (2): 106–111. Dong Xuhui, Qi Hui, Ren Lijun, et al. 2007. Application and data demonstration of lidar in sandstorm observation [J]. *Research of Environmental Sciences (in Chinese)*, 20 (2): 106–111.
- 段婧, 毛节泰. 2007. 长江三角洲大气气溶胶光学厚度分布和变化趋势研究 [J]. *环境科学学报*, 27 (4): 537–543. Duan Jing, Mao Jietai. 2007. Study on the distribution and variation trends of atmospheric aerosol optical depth over the Yangtze River delta [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 27 (4): 537–543.
- 段民征. 2001. 陆地上空大气气溶胶和地表反照率的同时反演——卫星标量辐射和偏振信息的联合利用 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Duan Minzheng. 2001. Simultaneously retrieval of atmospheric aerosol optical depth and surface albedo over land by using polarized radiance as well as scalar radiance from satellite measurement [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- Dubovik O, King M D. 2000. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (D16): 20673–20696.
- Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, et al. 2000. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) sun and sky radiance measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 105(D8): 9791–9806.
- Eck T F, Holben B N, Reid J S, et al. 1999. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols [J]. *J. Geophys. Res.*, 104: 31333–31350.
- Evans K F, Stephens G L. 1991. A new polarized atmospheric radiative transfer model. *J. Quant. Spec. Radiat. Transfer*, 46 (5): 413–423.
- 范学花. 2006. PARASOL 卫星偏振信息遥感北京地区气溶胶光学特性的研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Fan Xuehua. 2006. Retrieval of aerosol optical properties over Beijing from polarized signals of PARASOL [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- Fan X H, Goloub P, Deuzé J L, et al. 2008. Evaluation of PARASOL aerosol retrieval over North East Asia [J]. *Remote Sens. Environ.*, 112: 697–707.
- Fan X H, Chen H B, Lin L F, et al. 2009. Retrieval of aerosol optical properties over the Beijing area using POLDER/PARASOL satellite polarization measurements [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (6): 1099–1107.
- Fan X H, Chen H B, Xia X A, et al. 2010. Aerosol optical properties from the atmospheric radiance measurement mobile facility at Shouxian, China [J]. *J. Geophys. Res.*, 115: D00K33, doi:10.1029/2010JD014650.
- Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing [C]// *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S. et al. (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- 高玲, 任通, 李成才, 等. 2012. 利用静止卫星 MTSAT 反演大气气溶胶光学厚度 [J]. *气象学报*, 70 (3): 598–608. Gao Ling, Ren Tong, Li Chengcai, et al. 2012. A retrieval of the aerosol optical depth from MTSAT [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 70 (3): 598–608.
- 高庆先, 任阵海, 张运刚, 等. 2004. 利用静止卫星资料跟踪沙尘天气的发生、发展及其传输 [J]. *资源科学*, 26 (5): 24–29. Gao Qingxian, Ren Zhenhai, Zhang Yungang, et al. 2004. Dust event and its formation, development and transportation based on satellite data [J]. *Resources Science (in Chinese)*, 26 (5): 24–29.
- 高枫亭, 张仁建, 苏丽欣. 2009. 长春秋冬季大气黑碳气溶胶的特征分析 [J]. *高原气象*, 28 (4): 803–807. Gao Zongting, Zhang Renjian, Su Lixin. 2009. Characteristic analysis of atmospheric black carbon aerosols in Changchun in autumn and winter [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (4): 803–807.
- 韩志刚. 1999. 草地上空对流层气溶胶特性的卫星偏振遥感——正问题模式系统和反演初步实验 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Han Zhigang. 1999. Aerosol retrievals over steppe with POLDER data [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- Hansen J, Sato M, Ruedy R. 1997. Radiative forcing and climate response [J]. *J. Geophys. Res.*, 102: 6831–6864.
- He Q S, Li C C, Geng F H, et al. 2012. Aerosol optical properties retrieved from Sun photometer measurements over Shanghai, China [J]. *J. Geophys. Res.*, 117: D16204, doi:10.1029/2011JD017220.
- 何秀, 邓兆泽, 李成才, 等. 2010. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM₁₀ 监测方面的应用研究 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 46 (2): 178–184. He Xiu, Deng Zhaoze, Li Chengcai, et al. 2010. Application of MODIS AOD in surface PM₁₀ evaluation [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 46 (2): 178–184.
- Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. 1998. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sens. Environ.*, 66 (1): 1–16.
- Holben B N, Tanré D, Smirnov A, et al. 2001. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 12067–12097.

- 胡波, 张武, 张镭, 等. 2003. 兰州市西固区冬季大气气溶胶粒子的散射特征 [J]. 高原气象, 22 (4): 354–360. Hu Bo, Zhang Wu, Zhang Lei, et al. 2003. A study on scattering properties of aerosol particle over Xigu district of Lanzhou [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (4): 354–360.
- 胡欢陵, 许军, 黄正. 1991. 中国东部若干地区大气气溶胶虚折射指数特征 [J]. 大气科学, 15 (1): 18–23. Hu Huanling, Xu Jun, Huang Zheng. 1991. Characteristics of imaginary part of aerosol refractive index in some areas of eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 15 (1): 18–23.
- 胡顺星, 王珍珠, 徐青山, 等. 2006. 激光雷达测量大气气溶胶光学厚度方法研究 [J]. 量子电子学报, 23 (3): 307–310. Hu Shunxing, Wang Zhenzhu, Xu Qingshan, et al. 2005. Studies on methods for aerosol optical depth measurements by lidar [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics (in Chinese), 23 (3): 307–310.
- 胡秀清, 卢乃锰, 邱红. 2003. 利用静止气象卫星监测沙尘暴 [J]. 气候与环境研究, 8 (1): 101–106. Hu Xiuqing, Lu Naimeng, Qiu Hong. 2003. Dust-storm monitoring using geostationary meteorological satellites [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (1): 101–106.
- 胡秀清, 张玉香, 张广顺, 等. 2001. 中国遥感卫星辐射校正场气溶胶光学特性观测研究 [J]. 应用气象学报, 12 (3): 257–266. Hu Xiuqing, Zhang Yuxiang, Zhang Guangshun, et al. 2001. Measurements and study of aerosol optical characteristics in China radiometric calibration sites [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 12 (3): 257–266.
- 胡秀清, 卢乃锰, 张鹏, 等. 2007. 利用静止气象卫星红外通道遥感监测中国沙尘暴 [J]. 应用气象学报, 18 (3): 266–275. Hu Xiuqing, Lu Naimeng, Zhang Peng, et al. 2007. Remote sensing and detection of dust storm in China using the thermal bands of geostationary meteorological satellite [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 18 (3): 266–275.
- Huang J P, Minnis P, Yi Y H, et al. 2007. Summer dust aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau [J]. Geophys. Res. Lett., 2007, 34: L18805.
- Huang J P, Huang Z W, Bi J R, et al. 2008a. Micro-pulse lidar measurements of aerosol vertical structure over the Loess Plateau [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 1 (1): 8–11.
- Huang J P, Minnis P, Chen B, et al. 2008b. Long-range transport and vertical structure of Asian dust from CALIPSO and surface measurements during PACDEX [J]. J. Geophys. Res., 113: D23212, doi:10.1029/2008JD010620.
- 黄世鸿, 李子华, 杨军. 2000. 中国地区边界层大气气溶胶辐射吸收特性 [J]. 高原气象, 19 (4): 487–494. Huang Shihong, Li Zihua, Yang Jun. 2000. Light-absorbing properties of aerosols in the atmospheric boundary layer over China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19 (4): 487–494.
- 黄忠伟. 2012. 气溶胶物理光学特性的激光雷达遥感研究 [D]. 兰州大学博士学位论文. Huang Zhongwei. 2012. Study of physical and optical properties of atmospheric aerosols using lidar [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University.
- Kaufman Y J, Nakajima T. 1993. Effect of Amazon smoke on cloud microphysics and albedo—Analysis from satellite imagery [J]. J. Appl. Meteor., 32, 729–744.
- Kaufman Y J, Tanré D, Remer L, et al. 1997. Remote sensing of tropospheric aerosols from EOS-MODIS over land [J]. J. Geophys. Res., 102: 17051–17067.
- 柯宗建. 2004. 我国东部地区气溶胶光学特性观测研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文. Ke Zongjian. 2004. Observational study of aerosol optical properties in eastern China [D]. M. S. thesis (in Chinese). Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- 柯宗建, 汤洁, 王炳忠, 等. 2004. 积分浊度计在沙尘暴监测网试验中应用分析 [J]. 气象科技, 32 (4): 258–262. Ke Zongjian, Tang Jie, Wang Bingzhong, et al. 2004. Primary analysis of application results of integrating nephelometers in dust storm monitoring network experiment [J]. Meteorological Sciences and Technology (in Chinese), 32 (4): 258–262.
- 柯宗建, 汤洁. 2007. 北京上甸子秋冬季大气气溶胶的散射特性 [J]. 大气科学, 31 (3): 553–559. Ke Zongjian, Tang Jie. 2007. An observation study of the scattering properties of aerosols over Shangdianzi, Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (3): 553–559.
- Lau K M, Kim M K, Kim K M. 2006. Aerosol induced anomalies in the Asian summer monsoon: The role of the Tibetan Plateau [J]. Climate Dyn., 26 (7–8): 855–864, doi:10.1007/s00382-006-0114-z.
- Li B G, Yuan H S, Feng N, et al. 2009. Comparing MODIS and AERONET aerosol optical depth over China [J]. Int. J. Remote Sens., 30 (24): 6519–6529.
- 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 2003. 利用 MODIS 遥感大气气溶胶及气溶胶产品的应用 [J]. 北京大学学报, 39: 108–117. Li Chengcai, Mao Jietai, Liu Qihan. 2003. Remote sensing aerosol with MODIS and the application of MODIS aerosol products [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 39: 108–117.
- 李成才, 刘启汉, 毛节泰, 等. 2004. 利用 MODIS 卫星和激光雷达遥感资料研究香港地区的一次大气气溶胶污染 [J]. 应用气象学报, 15: 641–650. Li Chengcai, Liu Qihan, Mao Jietai, et al. 2004. An aerosol pollution episode in Hong Kong with remote sensing products of MODIS and lidar [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 15: 641–650.
- Li C, Marufu L T, Dickerson R R, et al. 2007. In situ measurements of trace gases and aerosol optical properties at a rural site in northern China during East Asian Study of Tropospheric Aerosols: An international regional experiment 2005 [J]. J. Geophys. Res., 112: D22S04, doi:10.1029/2006JD007592.
- 李崇. 2011. 利用激光雷达观测资料研究沙尘气溶胶及其影响 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Li Chong. 2011. Research on dust aerosol and its impacts from lidar observation data [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 李放, 吕达仁. 1996. 北京地区气溶胶光学厚度中长期变化特征 [J]. 大气科学, 20: 385–398. Li Fang, Lü Daren. 1996. The mid-long term features of atmospheric aerosol optical depths over Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 20: 385–398.
- 李洪敬. 2005. 苏州城区 1064 nm 激光雷达大气消光特性的研究 [D]. 苏州大学硕士学位论文. Li Hongjing. 2005. Study of atmospheric extinction properties over Suzhou city with 1064 nm lidar [D]. M. S.

- thesis (in Chinese), Suzhou University.
- 黎洁, 毛节泰. 1989. 光学遥感大气气溶胶特性 [J]. 气象学报, 47 (4): 450–456. Li Jie, Mao Jietai. 1989. Inverse of the property of atmospheric aerosols by optical remote sensing [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 47 (4): 450–456.
- Li S S, Chen L F, Tao J H, et al. 2012. Retrieval of aerosol optical depth over bright targets in the urban areas of North China during winter [J]. Sci. China Earth Sci., 55: 1545–1553, doi:10.1007/s11430-012-4432-1.
- 李霞, 陈勇航, 胡秀清, 等. 2005. 乌鲁木齐大气气溶胶光学特性分析 [J]. 中国环境科学, 25 (Suppl.): 22–25. Li Xia, Chen Yonghang, Hu Xiuqing, et al. 2005. Analysis of atmospheric aerosol properties over Urumqi [J]. China Environmental Science (in Chinese), 25 (Suppl.): 22–25.
- 李晓静, 张鹏, 张兴赢, 等. 2009. 中国区域 MODIS 陆上气溶胶光学厚度产品检验 [J]. 应用气象学报, 20 (2): 147–156. Li Xiaojing, Zhang Peng, Zhang Xingying, et al. 2009. Validation of aerosol optical thickness product over China with MODIS data operated at NSMC [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 20 (2): 147–156.
- 李学彬, 黄印博, 徐亦东, 等. 2008. 厦门地区气溶胶折射率的测量 [J]. 光学精密工程, 16 (10): 1831–1835. Li Xuebin, Huang Yinbo, Xu Chidong, et al. 2008. Measurement of refractive index for aerosol particle in Xiamen [J]. Optics Precision Engineering (in Chinese), 16 (10): 1831–1835.
- 李杨, 曹军骥, 张小曳, 等. 2005. 2003 年秋季西安大气中黑碳气溶胶的演化特征及其来源解析 [J]. 气候与环境研究, 10 (2): 229–237. Li Yang, Cao Junji, Zhang Xiaoye, et al. 2005. The variability and source apportionment of black carbon aerosol in Xi'an atmosphere during the autumn of 2003 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (2): 229–237.
- 李正强, 赵凤生. 2001. 利用静止气象卫星数据确定大气气溶胶光学厚度 [J]. 量子电子学报, 18 (4): 381–384. Li Zhengqiang, Zhao Fengsheng. 2001. Retrieval atmospheric aerosol optical thickness from geostationary meteorological satellite Data [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics (in Chinese), 18 (4): 381–384.
- Li Z Q, Goloub P, Devaux C, et al. 2006. Retrieval of aerosol optical and physical properties from ground-based spectral, multi-angular, and polarized sun-photometer measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 101: 519–533.
- Li Z Q, Xia X A, Cribb M, et al. 2007a. Aerosol optical properties and its radiative effects in northern China [J]. J. Geophys. Res., 112: D22S01, doi:10.1029/2006JD007382.
- Li Z Q, Niu F, Lee K, et al. 2007b. Validation and understanding of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol products (C5) using ground-based measurements from the handheld Sun photometer network in China [J]. J. Geophys. Res., 112: D22S07, doi:10.1029/2007JD008479.
- Li Z Q, Blarel L, Podvin T, et al. 2008. Transferring the calibration of direct solar irradiance to diffuse-sky radiance measurements for CIMEL Sun-sky radiometers [J]. Appl. Opt., 47 (10): 1368–1377.
- 刘诚, 明海, 王沛, 等. 2006. 西藏那曲与北京郊区对流层气溶胶的微脉冲激光雷达测量 [J]. 光子学报, 9: 1435–1440. Liu Cheng, Ming Hai, Wang Pei, et al. 2006. Measurements of the aerosol over Naqu of Tibet and suburb of Beijing by micro pulse lidar (MPL) [J]. Acta Photonica Sinica (in Chinese), 9: 1435–1440.
- 刘东, 戚福弟, 金传佳, 等. 2003. 合肥上空卷云和沙尘气溶胶退偏振比的激光雷达探测 [J]. 大气科学, 27 (6): 1093–1100. Liu Dong, Qi Fudi, Jin Chuanjia, et al. 2003. Polarization lidar observations of cirrus clouds and Asian dust aerosols over Hefei [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (6): 1093–1100.
- 刘广员, 孙毅义. 1997. 利用卫星可见光通道反演整层大气气溶胶光学厚度 [J]. 气象科学, 17 (2): 159–167. Liu Guangyuan, Sun Yiyi. 1997. Retrieval for aerosol optical thickness using data of NOAA-14/AVHRR visible band [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 17 (2): 159–167.
- 刘广员, 孙毅义. 1998. 大气气溶胶光学厚度的卫星双通道遥感方法 [J]. 南京气象学院学报, 21 (3): 321–327. Liu Guangyuan, Sun Yiyi. 1998. A dual-channel algorithm for aerosol optical thickness remote sensing with satellite [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 21 (3): 321–327.
- 刘桂青, 李成才, 朱爱华, 等. 2003. 长江三角洲地区大气气溶胶光学厚度研究 [J]. 上海环境科学, 增刊, 58–63. Liu Guiqing, Li Chengcai, Zhu Aihua, et al. 2003. Optical depth study on atmospheric aerosol in Yangtze River Delta region [J]. Shanghai Environmental Sciences (in Chinese), suppl., 58–63.
- Liu J J, Zheng Y F, Li Z P, et al. 2012. Seasonal variations of aerosol optical properties, vertical distribution and associated radiative effects in the Yangtze Delta region of China [J]. J. Geophys. Res., 117: D00K38, doi:10.1029/2011JD016490.
- 刘金涛, 陈卫标, 刘智深. 2003. 高光谱分辨率激光雷达同时测量大气风和气溶胶光学性质的模拟研究 [J]. 大气科学, 27 (1): 155–122. Liu Jintao, Chen Weibiao, Liu Zhishen. 2003. A simulation of simultaneously measuring wind and aerosol optical properties using high spectral resolution lidar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (1): 115–122.
- 刘琼, 耿福海, 陈勇航, 等. 2012. 上海不同强度干霾期间气溶胶垂直分布特征 [J]. 中国环境科学, 32 (2): 207–213. Liu Qiong, Geng Fuhai, Chen Yonghang, et al. 2012. Vertical distribution of aerosols during different intense dry haze periods around Shanghai [J]. China Environmental Science (in Chinese), 32 (2): 207–213.
- 刘新罡, 张远航, 曾立民, 等. 2006. 广州市大气能见度影响因子的贡献研究 [J]. 气候与环境研究, 11 (6): 733–738. Liu Xingang, Zhang Yuanhang, Zeng Limin, et al. 2006. Research on the influential factor of visibility reduction in Guangzhou [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (6): 733–738.
- Liu Y, Yang D, Chen W, et al. 2010. Measurements of Asian dust optical properties over the Yellow Sea of China by shipboard and ground-based photometers, along with satellite remote sensing: A case study of the passage of a frontal system during April 2006 [J]. J. Geophys. Res., 115: D00K04, doi:10.1029/2009JD012684.
- 吕达仁, 魏重, 张健国. 1976. 激光探测能见度的实验研究 [J]. 大气科学, (1): 55–61. Lü Daren, Wei Chong, Zhang Jianguo. 1976. Experimental study of visibility observation using lidar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), (1): 55–61.
- 吕达仁, 魏重, 林海, 等. 1977. 低层大气消光系数分布的激光探测 [J].

- 大气科学, (3): 199–205. Lü Daren, Wei Chong, Lin Hai, et al. 1977. Measurements of lower-atmospheric extinction coefficient distribution by lidar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), (3): 199–205.
- 吕达仁, 周秀骥, 邱金桓. 1981. 消光一小角散射综合遥感气溶胶分布的原理与数值试验 [J]. 中国科学, 12: 1516–1523. Lü Daren, Zhou Xiuj, Qiu Jinhuan. 1981. Theory and experimental study of remote sensing of atmospheric aerosol size distribution by combined solar extinction and forward scattering method [J]. Science in China (in Chinese), 12: 1516–1523.
- 吕达仁. 1982. 考虑二次散射的激光雷达近似方程与低能见度的激光探测 [J]. 地球物理学报, 25 (1): 1–9. Lü Daren. 1982. A lidar equation taking consideration of double scattering and its application for low visibility measurements [J]. Chinese Journal Geophysics (in Chinese), 25 (1): 1–9.
- 吕达仁, 李卫, 章文星. 1998. 大气气溶胶光学厚度与地表反射率的同时遥感——原理和初步数值试验 [C]// 地球环境和气候变化探测与过程研究. 北京: 气象出版社. Lü Daren, Li Wei, Zhang Wenxing. 1998. Simultaneously retrieval of atmospheric aerosol optical depth and surface reflectance: Theory and preliminary numerical experiment [C]// Environment, Climate Change Measurement and Process Study (in Chinese). Beijing: Meteorological Press.
- 陆辉, 魏文寿, 刘明哲, 等. 2010. 塔克拉玛干沙漠腹地大气气溶胶散射特征研究 [J]. 中国沙漠, 30 (3): 660–667. Lu Hui, Wei Wenshou, Liu Mingzhe, et al. 2010. Aerosol scattering properties in the Hinterland of Taklimakan desert [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 30 (3): 660–667.
- 陆辉, 魏文寿, 吴新萍, 等. 2011. 利用黑碳仪观测数据分离气溶胶吸收系数的计算方法 [J]. 沙漠与绿洲气象, 5 (2): 36–39. Lu Hui, Wei Wenshou, Wu Xinping, et al. 2011. Approach to decouple aerosol absorption coefficients using aethalometer observational data [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 5 (2): 36–39.
- 栾胜基, 毛节泰. 1986. 大气气溶胶吸收系数的测量 [J]. 气象学报, 44 (3): 321–327. Luan Shengji, Mao Jietai. 1986. The measurement of the absorption coefficient of atmospheric aerosol [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 44 (3): 321–327.
- 罗云峰, 吕达仁, 李维亮, 等. 2000. 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, 45 (5): 549–554. Luo Yunfeng, Lü Daren, Li Weiliang, et al. 2000. Characteristics of atmospheric aerosol optical depth variation over China in recent 30 years [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 45 (5): 549–554.
- 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 等. 2002. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征析 [J]. 大气科学, 26 (6): 721–730. Luo Yunfeng, Lü Daren, Zhou Xiuj, et al. 2002. Analyses on the spatial distribution of aerosol optical depth over China in recent 30 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (6): 721–730.
- 姜淑娟, 毛节泰, 王美华. 2005. 北京地区不同尺度气溶胶中黑碳含量的观测研究 [J]. 环境科学学报, 25 (1): 17–22. Lou Shujuan, Mao Jietai, Wang Meihua. 2005. Observational study of black carbon aerosol in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 25 (1): 17–22.
- 马盈盈, 龚威, 朱忠敏. 2009. 中国东南部地区气溶胶光学特性激光雷达探测 [J]. 遥感学报, 13 (4): 715–722. Ma Yingying, Gong Wei, Zhu Zhongmin. 2009. Lidar monitoring of aerosol optical properties in southeastern China [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 13 (4): 715–722.
- 毛节泰, 王强, 赵柏林. 1983. 大气透明度光谱和浑浊度的观测 [J]. 气象学报, 41 (3): 322–331. Mao Jietai, Wang Qiang, Zhao Bolin. 1983. The observation of the atmospheric transparency spectrum and the turbidity [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 41 (3): 322–331.
- 毛节泰, 刘莉, 张军华. 2001. GMS5 卫星遥感气溶胶光学厚度的试验研究 [J]. 气象学报, 59 (3): 352–359. Mao Jietai, Liu Li, Zhang Junhua. 2001. GMS5 remote sensing of aerosol optical thickness over Chaohu lake [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 59 (3): 352–359.
- 毛节泰, 李成才, 张军华. 2002a. 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, 13: 127–135. Mao Jietai, Li Chengcai, Zhang Junhua. 2002a. The comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data and ground sun photometer observations [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13: 127–135.
- 毛节泰, 张军华, 王美华. 2002b. 中国大气气溶胶研究综述 [J]. 气象学报, 60 (5): 625–634. Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. 2002b. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (5): 625–634.
- 毛节泰, 李成才. 2005. 气溶胶辐射特性的观测研究 [J]. 气象学报, 63 (5): 622–635. Mao Jietai, Li Chengcai. 2005. Observation study of aerosol radiative properties over China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (5): 623–635.
- 毛晓琴. 2010. 上海地区灰霾气溶胶物理特性研究 [D]. 东华大学硕士学位论文. Mao Xiaoqin. 2010. Study on physical properties of haze aerosols in Shanghai [D]. M. S. thesis (in Chinese), Donghua University.
- Mi W, Li Z, Xia X, et al. 2007. Evaluation of the moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol products at two aerosol robotic network stations in China [J]. J. Geophys. Res., 112: D22S08, doi:10.1029/2007JD008474.
- 潘鹤. 2010. 利用微脉冲激光雷达研究上海灰霾气溶胶光学特性 [D]. 东华大学硕士学位论文. Pan Hu. 2010. Study on optical properties of haze aerosol at Shanghai with micro-pulse lidar [D]. M. S. thesis (in Chinese), Donghua University.
- Pan L, Che H Z, Geng F H, et al. 2010. Aerosol optical properties based on ground measurements over the Chinese Yangtze Delta Region [J]. Atmos. Environ., 44: 2587–2596, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.04.013.
- 潘小乐. 2007. 相对湿度对气溶胶散射特性影响的观测研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文. Pan Xiaole. 2007. Observation study of atmospheric aerosol scattering characteristics as a function of relative humidity [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- 潘小乐, 王自发, 王喜全, 等. 2010. 北京奥运会前后城区黑碳气溶胶浓度的变化特征 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 616–623. Pan Xiaole, Wang Zifa, Wang Xiquan, et al. 2010. Characteristics of urban black carbon concentration around 2008 Beijing Olympic Games [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 616–623.
- 秦世广. 2001. 我国大陆地区大气黑碳气溶胶观测研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文. Qin Shiguang. 2001. Observational study on black carbon aerosols in rural land remote sites of China [D]. M. S.

- thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- 邱金桓, 赵燕曾, 汪宏七. 1984. 激光探测沙尘过程中的气溶胶消光系数分布 [J]. 大气科学, 8 (2): 205–210. Qiu Jinhuan, Zhao Yanzeng, Wang Hongqi. 1984. Detection of aerosol extinction coefficient profiles during dust storms by lidar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 8 (2): 205–210.
- Qiu Jinhuan. 1986. An approximate expression of the sky radiance in almucantar and its application [J]. Adv. Atmos. Sci., 3 (1): 1–9.
- 邱金桓, 黄其荣, 赵红接, 等. 1988a. 激光探测机场斜视跑道视程的实验研究 [J]. 大气科学, 12 (3): 291–300. Qiu Jinhuan, Huang Qirong, Zhao Hongjie, et al. 1988a. An experimental study of airport-runway Slant Visual Range measurement by lidar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 12 (3): 292–300.
- 邱金桓, 孙金辉, 夏其林, 等. 1988b. 北京大气气溶胶光学特性的综合遥感和分析 [J]. 气象学报, 46 (1): 49–58. Qiu Jinhuan, Sun Jinhui, Xia Qilin, et al. 1988b. Remote sensing and analysis of aerosol optical properties in Beijing [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 46 (1): 49–58.
- 邱金桓, 吕达仁. 1992. 参数化的多次散射雷达方程和它的反演理论 II. 反演理论 [J]. 大气科学, 16 (6): 725–736. Qiu Jinhuan, Lü Daren. 1992. Parameterized lidar equation of multiple scattering and its retrieval theory. Part II: Retrieval theory [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 16 (6): 725–736.
- 邱金桓, Quenzel H, Wiegner M. 1992. 参数化的多次散射雷达方程和它的反演理论 I. 方程 [J]. 大气科学, 16 (3): 229–239. Qiu Jinhuan, Quenzel H, Wiegner M. 1992. Parameterized lidar equation of multiple scattering and its retrieval theory. Part I: Equations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 16 (3): 229–239.
- 邱金桓, 孙金辉. 1994. 沙尘暴的光学遥感及分析 [J]. 大气科学, 18 (1): 1–10. Qiu Jinhuan, Sun Jinhui. 1994. Optically remote sensing of the dust storm and result analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 18 (1): 1–10.
- 邱金桓. 1995. 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, 19 (4): 385–394. Qiu Jinhuan. 1995. A new method of determining atmospheric aerosol optical depth from the whole spectral solar direct radiation. Part I: Theory [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 19 (4): 385–394.
- 邱金桓, 潘继东, 杨理权, 等. 1997. 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, 21 (6): 725–733. Qiu Jinhuan, Pan Jidong, Yang Liquan, et al. 1997. Variation of atmospheric aerosols over 10 sites in China during 1980–1994 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 21 (6): 725–733.
- Qiu Jinhuan. 1998. A method of spaceborne synthetic remote sensing of aerosol optical depth and vegetation reflectance [J]. Adv. Atmos. Sci., 15(1): 17–30.
- Qiu Jinhuan, Yang Liquan. 1999. Lidar monitoring of aerosol and yellow sand in Beijing [J]. The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 1: 33–34.
- Qiu Jinhuan, Takeuchi N. 2001. Effects of aerosol inhomogeneity on satellite optical remote sensing [J]. Adv. Atmos. Sci., 18 (4): 539–553.
- 邱金桓, 杨理权. 2002. 从宽带太阳直接辐射小时或日曝辐量反演气溶胶光学厚度研究 [J]. 大气科学, 26 (4): 449–458. Qiu Jinhuan, Yang Liquan. 2002. A study of retrieving aerosol optical depth from day- or hour-exposed broadband solar direct radiation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (4): 449–458.
- 邱金桓, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 2003a. 现代大气物理学研究进展 [J]. 大气科学, 27 (4): 628–652. Qiu Jinhuan, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. 2003a. Modern research progress in atmospheric physics [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 628–652.
- 邱金桓, 郑斯平, 黄其荣, 等. 2003b. 北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测 [J]. 大气科学, 27 (1): 1–7. Qiu Jinhuan, Zheng Siping, Huang Qirong, et al. 2003b. Lidar measurements of cloud and aerosol in the upper troposphere in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (1): 1–7.
- Ramaswamy V, Boucher O, Haigh J, et al. 2001. Radiative forcing of climate change [M] // Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J. T., et al., Eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 349–416.
- 任通, 高玲, 李成才, 等. 2011. 利用风云 2C 静止卫星可见光资料反演气溶胶光学厚度 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 47 (4): 636–646. Ren Tong, Gao Ling, Li Chengcai, et al. 2011. Retrieval of aerosol optical depth from Fengyun-2C geostationary satellite observation: Theory and implementation [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 47 (4): 636–646.
- 邵培, 麻金继, 洪超. 2012. 基于偏振数据反演北京地区气溶胶光学厚度及其时空特征的研究 [J]. 大气与环境光学学报, 7 (2): 108–115. Shao Pei, Ma Jinji, Hong Chao, et al. 2012. Spatial-temporal features of aerosol optical thickness on polarization information in Beijing area [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics (in Chinese), 7 (2): 108–115.
- 申莉莉, 盛立芳, 陈静静. 2010. 一次强沙尘暴过程中沙尘气溶胶空间分布的初步分析 [J]. 中国沙漠, 30 (6): 1483–1490. Shen Lili, Sheng Lifang, Chen Jingjing. 2010. Preliminary analysis of the spatial distribution of aerosol in a heavy dust storm [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 30 (6): 1483–1490.
- 宋磊, 吕达仁. 2006. 上海地区大气气溶胶光学特性的初步研究 [J]. 气候与环境研究, 11 (2): 203–208. Song Lei, Lü Daren. 2006. Investigation of atmospheric optical characteristics over Shanghai region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (2): 203–208.
- 宋小全, 郭金家, 闫召爱, 等. 2008. 大气气溶胶光学参数的高光谱分辨率激光雷达探测研究 [J]. 自然科学进展, 18 (9): 1009–1015. Song Xiaoquan, Guo Jinjia, Yan Zhaoai, et al. 2008. Study of measuring atmospheric aerosol optical properties using high spectral resolution lidar [J]. Progress in Natural Science (in Chinese), 18 (9): 1009–1015.
- 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 2003. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系 [J]. 环境科学学报, 23 (4): 468–471. Song Yu, Tang Xiaoyan, Fang Chen, et al. 2003. Relationship between the visibility degradation and particle pollution in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 23 (4): 468–471.
- Spinhirne J D. 1993. Micro pulse lidar [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 31: 48–55.
- 苏晨, 张小玲, 刘强, 等. 2009. 上甸子本底站气溶胶散射系数变化特征

- 的初步分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (5): 537–545. Su Chen, Zhang Xiaoling, Liu Qiang, et al. 2009. Analysis of the characteristics of aerosol scattering coefficient at Shangdianzi background station [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (5): 537–545.
- 苏小莉. 2010. POLDER 偏振信息遥感东亚地区气溶胶特性的研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Su Xiaoli. 2010. Analyses of aerosol characteristics over east Asia using POLDER observations [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- 孙杰, 孙天乐, 何凌燕. 2012. 深圳市环境空气中黑碳气溶胶的污染特征研究 [J]. 中国测试, 38 (3): 8–11. Sun Jie, Sun Tianle, He Lingyan. 2012. Pollution characteristics of black carbon aerosol in ambient air of Shenzhen [J]. China Measurement and Test (in Chinese), 38 (3): 8–11.
- 孙金辉, 邱金桓, 夏其林, 等. 1986. 激光探测平流层气溶胶层后向散射系数分布 [J]. 大气科学, 10 (4): 431–436. Sun Jinhui, Qiu Jinhuan, Xia Qilin, et al. 1986. Vertical distribution of stratospheric aerosol backscattering ratio measured by lidar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 10 (4): 431–436.
- 孙金辉, 邱金桓, 夏其林, 等. 1993. 激光探测平流层火山云 [J]. 科学通报, 38 (7): 631–633. Sun Jinhui, Qiu Jinhuan, Xia Qilin, et al. 1993. Lidar observations of stratospheric volcanic clouds [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 38 (7): 631–633.
- 孙金辉, 夏其林, 邱金桓, 等. 1995. 激光雷达探测南极平流层云 [J]. 南极研究, 7 (1): 62–68. Sun Jinhui, Xia Qilin, Qiu Jinhuan, et al. 1995. Lidar observations of polar stratospheric clouds in Antarctic [J]. Antarctic Research (in Chinese), 7 (1): 62–68.
- 孙景群. 1986. 激光大气遥感 [M]. 北京: 科学出版社. Sun Jingqun. 1986. Remote Sensing of the Atmosphere by Laser (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 孙夏, 赵慧洁. 2009. 气溶胶光学特性偏振遥感反演算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 35 (8): 1027–1030. Sun Xia, Zhao Huijie. 2009. Retrieval algorithm for optical parameters of aerosol using polarized remote sensing [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (in Chinese), 35 (8): 1027–1030.
- 汤洁, 温玉璞, 周凌唏, 等. 1999. 中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究 [J]. 应用气象学报, 5, 160–169. Tang Jie, Wen Yupu, Zhou Lingxi, et al. 1999. Observational study of black carbon in clean air area of western China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 5: 160–169.
- 陶俊, 朱李华, 韩静磊, 等. 2008. 2007 年春季广州城区黑碳气溶胶污染特征的初步研究 [J]. 气候与环境研究, 13 (5): 658–662. Tao Jun, Zhu Lihua, Han Jinglei, et al. 2008. Preliminary study on characteristics of black carbon aerosol pollution in guangzhou during the spring of 2007 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (5): 658–662.
- Twomey S. 1977. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds [J]. J. Atmos. Sci., 34: 1149–1151.
- Twomey S, Warner J. 1967. Comparison of measurements of cloud droplets and cloud nuclei [J]. J. Atmos. Sci., 24: 702–703.
- 王栋梁, 邱金桓. 1988. 塔克拉玛干沙漠春季大气气溶胶光学特性研究 [J]. 大气科学, 12 (1): 75–81. Wang Dongliang, Qiu Jinhuan. 1988. The study of atmospheric aerosol optical properties in Takla-Makan desert in spring [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 12 (1): 75–81.
- 王庚辰, 孔琴心, 刘广仁, 等. 1998. 秋末冬初北京大气中颗粒物的变化 [J]. 大气环境科学技术进展, 11: 210–215. Wang Gengchen, Kong Qinxin, Liu Guangren, et al. 1998. Variation of atmospheric particles in Beijing during later autumn and early winter [J]. Advances Atmospheric Environmental Science and Technology (in Chinese), 11: 210–215.
- 王庚辰, 孔琴心, 任丽新, 等. 2002. 北京地区大气中黑碳气溶胶及其变化特征 [J]. 过程工程学报, 2: 284–288. Wang Gengchen, Kong Qinxin, Ren Lixin, et al. 2002. Black carbon aerosol and its variations in the urban atmosphere in Beijing area [J]. The Chinese Journal of Process Engineering (in Chinese), 2: 284–288.
- 王莉莉, 辛金元, 王跃思, 等. 2007. CSHNET 观测网评估 MODIS 气溶胶产品在中国区域的适用性 [J]. 科学通报, 52 (4): 477–486. Wang Lili, Xin Jinyuan, Wang Yuesi, et al. 2007. Validation of MODIS aerosol products by CSHNET over China [J]. Chinese Science Bulletin, 52 (12): 1708–1718.
- Wang P, Che H Z, Zhang X C, et al. 2010. Aerosol optical properties of regional background atmosphere in Northeast China [J]. Atmospheric Environment, 44: 4404–4412.
- Wang S P, Fang L, Gu X F, et al. 2011a. Comparison of aerosol optical properties from Beijing and Kanpur [J]. Atmospheric Environment, 45: 7406–7414.
- 王绪鑫, 马雁军, 向旬, 等. 2010. 鞍山黑碳气溶胶观测 [J]. 环境化学, 29 (6): 1091–1095. Wang Xuxin, Ma Yanjun, Xiang Xun, et al. 2010. Observational of black carbon aerosols in Anshan [J]. Environmental Chemistry (in Chinese), 29 (6): 1091–1095.
- Wang Y S, Xin J Y, Li Z Q, et al. 2011b. Seasonal variations in aerosol optical properties over China [J]. J. Geophys. Res., 116: D18209, doi:10.1029/2010JD015376.
- 王中挺, 陈良富, 李莘莘. 2009. 利用 PARASOL 数据反演陆地气溶胶光学厚度 [J]. 遥感应用, (6): 49–54. Wang Zhongting, Chen Liangfu, Li Shenshen. 2009. The retrieval of AOD over land surfaces in China from PARASOL [J]. Remote Sensing and Application (in Chinese), (6): 49–54.
- 王中挺, 陈良富, 张莹, 等. 2008. 利用 MODIS 数据监测北京地区气溶胶 [J]. 遥感技术与应用, 23 (3): 284–289. Wang Zhongting, Chen Liangfu, Zhang Ying, et al. 2008. Urban surface aerosol monitoring using DDV method from MODIS data [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 23 (3): 284–288.
- 尉东胶, 邱金桓. 1998. 大气气溶胶折射率虚部的宽谱反演方法 I: 理论 [J]. 大气科学, 22 (5): 677–685. Wei Dongjiao, Qiu Jinhuan. 1998. Wide-band method to retrieve the imaginary part of complex refractive index of atmospheric aerosols. Part I: Theory [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (5): 677–685.
- 尉东胶, 邱金桓. 2000. 大气气溶胶折射率虚部的宽谱反演方法 II: 对比实验与应用研究 [J]. 大气科学, 24 (2): 145–151. Wei Dongjiao, Qiu Jinhuan. 2000. Wide-band method to retrieve the imaginary part of complex refractive index of atmospheric aerosols. Part II: Comparison measurement and application [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (2): 145–151.
- 吴兑, 毛节泰, 邓雪娇, 等. 2009. 珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 39 (11): 1542–1553.

- Wu D, Mao J T, Deng X J, et al. 2009. Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta region [J]. *Sci. China (Ser. D—Earth Sci.)* (in Chinese), 52 (8): 1152–1163.
- 吴德成, 刘博, 戚福弟, 等. 2011. Raman-Mie 激光雷达测量对流层大气气溶胶光学特性 [J]. *大气与环境光学学报*, 6 (1): 18–26. Wu Decheng, Liu Bo, Qi Fudi, et al. 2011. Tropospheric aerosol optical properties measured by a Raman-Mie lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics* (in Chinese), 6 (1): 18–26.
- 伍德侠, 魏庆农, 刘文清, 等. 2006. 2005 年夏季北京大气中碳黑气溶胶的观测研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 1 (3): 210–215. Wu Dexia, Wei Qingnong, Liu Wenqing, et al. 2006. Observation of black carbon aerosol in Beijing during the summer of 2005 [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics* (in Chinese), 1 (3): 210–215.
- Xia X A, Chen H B, Wang P C. 2004. Validation of MODIS aerosol retrievals and evaluation of potential cloud contamination in East Asia [J]. *J. Environ. Sci.*, 16: 832–837.
- Xia X A, Chen H B, Wang P C, et al. 2005. Aerosol properties and their spatial and temporal variations over North China in spring 2001 [J]. *Tellus*, 57 (1): 28–39.
- Xia X A, Chen H B, Wang P C, et al. 2006. Variation of column-integrated aerosol properties in a Chinese urban region [J]. *J. Geophys. Res.*, 111: D05204, doi:10.1029/2005JD006203.
- Xia X, Chen H, Goloub P, et al. 2007a. A compilation of aerosol optical properties and calculation of direct radiative forcing over an urban region in northern China [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D12203, doi:10.1029/2006JD008119.
- Xia X, Li Z, Wang P, et al. 2007b. Estimation of aerosol effects on surface irradiance based on measurements and radiative transfer model simulations in northern China [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D22S10, doi:10.1029/2006JD008337.
- Xia X, Li Z, Holben B, et al. 2007c. Aerosol optical properties and radiative effects in the Yangtze Delta region of China [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D22S12, doi:10.1029/2007JD008859.
- 夏祥鳌. 2006. 全球陆地上空 MODIS 气溶胶光学厚度显著偏高 [J]. *科学通报*, 51 (19): 2297–2303. Xia X A. 2006. Significant overestimation of global aerosol optical thickness by MODIS over land [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 51 (19): 2297–2303.
- Xia X A. 2011. Variability of aerosol optical depth and Angstrom wavelength exponent derived from AERONET observations in recent decades [J]. *Environ. Res. Lett.*, doi:10.1088/1748-9326/6/4/044011.
- Xia X A, Eck T F, Holben B, et al. 2008a. Analysis of the weekly cycle of aerosol optical depth using AERONET and MODIS data [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D14217, doi:10.1029/2007JD009604.
- Xia X A, Wang P C, Wang Y S, et al. 2008b. Aerosol optical depth over the Tibetan Plateau and its relation to aerosols over the Taklimakan Desert [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35: L16804, doi:10.1029/2008GL034981.
- Xia X A, Zong X M, Cong Z Y, et al. 2011. Baseline continental aerosol over the central Tibetan plateau and a case study of aerosol transport from South Asia [J]. *Atmos. Environ.*, 45: 7370–7378.
- 肖秀珠, 刘鹏飞, 耿福海, 等. 2011. 上海市区和郊区黑碳气溶胶的观测对比 [J]. *应用气象学报*, 22 (2): 158–168. Xiao Xiuzhu, Liu Pengfei, Geng Fuhai, et al. 2011. Research and application of MPL-A1/T micro pulse lidar [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 22 (2): 158–168.
- 谢晨波, 毛敏娟, 岳古明, 等. 2006. 新型车载式激光雷达探测对流层气溶胶 [J]. *光谱学与光谱分析*, 126 (11): 1973–1976. Xie Chenbo, Mao Minjuan, Yue Guming, et al. 2006. New mobile lidar for the measurements of tropospheric aerosol [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (in Chinese), 26 (11): 1973–1976.
- Xin J Y, Wang Y S, Li Z Q, et al. 2007. Aerosol optical depth (AOD) and Ångström exponent of aerosols observed by the Chinese Sun Hazemeter Network from August 2004 to September 2005 [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D05203, doi:10.1029/2006JD007075.
- Xin J Y, Wang L L, Wang Y S, et al. 2011. Trends in aerosol optical properties over the Bohai Rim in Northeast China from 2004 to 2010 [J]. *Atmospheric Environment*, 45: 6317–6325.
- 徐赤东, 纪玉峰. 2008. MPL-A1/T 型微脉冲激光雷达的研制与应用 [J]. *大气与环境光学学报*, 3 (5): 337–343. Xu Chidong, Ji Yufeng. 2008. Research and application of MPL-A1/T micro pulse lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics* (in Chinese), 3 (5): 337–343.
- Xu J, Bergin M H, Yu X, et al. 2002. Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China [J]. *Atmospheric Environment*, 36 (2): 161–173.
- Xu J, Bergin M H, Greenwald R, et al. 2004. Aerosol chemical, physical, and radiative characteristics near a desert source region of northwest China during ACE-Asia [J]. *J. Geophys. Res.*, 109: D19S03, doi:10.1029/2003JD004239.
- 徐记亮, 张镭, 吕达仁. 2011. 太湖地区大气气溶胶光学及微物理特征分析 [J]. *高原气象*, 30 (6): 1668–1675. Xu Jiliang, Zhang Lei, Lü Daren. 2011. Analyses on aerosol optical and microphysical properties over Taihu lake region [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 30 (6): 1668–1675.
- 徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 等. 2012. 环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征 [J]. *环境科学*, 33 (7): 2165–2171. Xu Tingting, Qin Yan, Geng Fuhai, et al. 2012. Seasonal variation in the vertical distribution of aerosols during dry haze periods in regions around Shanghai [J]. *Environmental Science* (in Chinese), 33 (7): 2165–2171.
- 许建明, 耿福海, 甄灿明, 等. 2010. 上海浦东地区气溶胶散射系数及影响因素 [J]. *环境科学学报*, 30 (1): 211–216. Xu Jianming, Geng Fuhai, Zhen Canming, et al. 2010. Aerosol scattering coefficients and the factors affecting them in Shanghai Pudong [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 30 (1): 211–216.
- 许潇锋, 邱金桓, 牛生杰. 2009. 利用水平面太阳直接辐射日曝辐量反演大气气溶胶光学厚度的方法研究 [J]. *大气科学*, 33 (2): 337–346. Xu Xiaofeng, Qiu Jinhuan, Niu Shengjie. 2009. A study of retrieving aerosol optical depth from daily horizontal broadband direct solar radiation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (2): 337–346.
- Xue Y, Xu H, Li Y, et al. 2011. Long-term aerosol optical depth datasets over China retrieved from satellite data [J]. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 4: 6643–6678.
- 阎邦华. 1997. 地气系统中太阳辐射的偏振特性及其在遥感中的应用研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所, 1997. Yan Banghua. 1997. Polarization properties of solar radiation in earth-atmosphere system and

- its application in remote sensing [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- 延昊, 矫梅燕, 赵琳娜, 等. 2008. 中国北方气溶胶散射和 PM_{10} 浓度特征 [J]. 高原气象, 27 (4): 852–858. Yan Hao, Jiao Meiyun, Zhao Linna, et al. 2008. Characteristics of aerosol light-scattering and PM_{10} concentration in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (4): 852–858.
- 颜鹏. 2006. 中国东部背景地区大气气溶胶光学特性研究 [D]. 北京大学博士学位论文. Yan Peng. 2006. Study on the aerosol optical properties in the background regions in the east part of China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Peking University.
- 颜鹏, 潘小乐, 汤洁, 等. 2008. 北京市区大气气溶胶散射系数亲水增长的观测研究 [J]. 气象学报, 66 (1): 111–119. Yan Peng, Pan Xiaole, Tang Jie, et al. 2008. An experimental study on the influence of relative humidity on the atmospheric aerosol scattering coefficient at an urban site in Beijing [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (1): 111–119.
- 颜鹏, 刘桂清, 周秀骥, 等. 2010. 上甸子秋冬季雾霾期间气溶胶光学特性 [J]. 应用气象学报, 21 (3): 257–265. Yan Peng, Liu Guiqing, Zhou Xiuji, et al. 2010. Characteristics of aerosol optical properties during haze and fog episodes at Shangdianzi in northern China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21 (3): 257–265.
- 杨莲梅, 张广兴, 魏文寿, 等. 2006. 粒子散射系数在沙尘天气观测分级中的初步分析 [J]. 中国沙漠, 26 (3): 380–383. Yang Lianmei, Zhang Guangxing, Wei Wenshou, et al. 2006. Primary analysis on particle scattering coefficient in classification of sand-dust weather observation [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 26 (3): 380–383.
- 杨晓武. 2009. 气溶胶的激光雷达探测和特性分析 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Yang Xiaowu. 2009. Lidar measurement of atmospheric aerosol and its features analysis [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- Yang S, Zhou X J, Zhao Y Z. 1986. A theoretical study of multi-wavelength lidar exploration of optical properties of atmospheric aerosols [J]. Adv. Atmos. Sci., 3 (1): 23–28.
- 杨溯, 张武, 韩晶晶, 等. 2008. 上海市浦东新区秋冬季黑碳气溶胶特性 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 44 (4): 66–70. Yang Su, Zhang Wu, Han Jingjing, et al. 2008. Characteristics of black carbon aerosol over Pudong district in Shanghai during autumn and winter [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences, in Chinese), 44 (4): 66–70.
- 杨溯, 石广玉, 王标, 等. 2011. 气溶胶光学厚度谱特征判断粒子大小方法初探 [J]. 应用气象学报, 22 (2): 152–157. Yang Su, Shi Guangyu, Wang Biao, et al. 2011. The application of AOD's spectral curve parameter to judgment of aerosol particle size [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 22 (2): 152–157.
- 杨昭. 2004. 基于 $1.06 \mu\text{m}$ 激光雷达的大气消光特性的研究 [D]. 苏州大学硕士学位论文. Yang Zhao. 2004. Performance of atmospheric extinction with a $1.06 \mu\text{m}$ lidar [D]. M. S. thesis (in Chinese), Suzhou University.
- 杨志峰, 张小曳, 车慧正, 等. 2008. CE318 型太阳光度计标定方法初探 [J]. 应用气象学报, 19 (3): 297–306. Yang Zhifeng, Zhang Xiaoye, Che Huizheng, et al. 2008. An introductory study on the calibration of CE318 sunphotometer [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 19 (3): 297–306.
- 余长明, 易帆. 2004. 武汉上空平流层气溶胶的激光雷达探测结果的初步分析 [J]. 空间科学学报, 24 (4): 261–268. Yu Changming, Yi Fan. 2004. Preliminary analysis on lidar observations of stratospheric aerosols over Wuhan [J]. Chinese Journal of Space Science (in Chinese), 24 (4): 261–268.
- Yu Xingna, Zhu Bin, Yin Yan, et al. 2011. Seasonal variation of columnar aerosol optical properties in Yangtze River Delta in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 28 (6): 1326–1335.
- 张冰. 2007. 地基与星载激光雷达探测青岛地区大气消光特性的研究 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文. Zhang Bing. 2007. Study of atmosphere extinction properties over Qingdao with ground-based and spaceborne lidar [D]. M. S. thesis (in Chinese), Ocean University of China.
- 张改霞, 张寅超, 胡顺星, 等. 2004a. AML-1 车载测污激光雷达探测大气边界层气溶胶 [J]. 强激光与粒子束, 16 (3): 286–290. Zhang Gaixiang, Zhang Yinchao, Hu Shunxing, et al. 2004a. Measurements of planetary boundary layer aerosols with mobile lidar AML-1 [J]. High Power Laser and Particle Beams (in Chinese), 16 (3): 286–290.
- 张改霞, 张寅超, 胡顺星, 等. 2004b. 车载测污激光雷达对大气边界层气溶胶的斜程测量 [J]. 光学学报, 24 (8): 1015–1019. Zhang Gaixiang, Zhang Yinchao, Hu Shunxing, et al. 2004b. Slant measurements of atmospheric boundary layer aerosol with mobile lidar [J]. Acta Optica Sinica (in Chinese), 24 (8): 1015–1019.
- 张怀清, 鞠洪波, 陈永富, 等. 2007. 沙尘天气激光雷达监测技术研究 [J]. 林业科学, 43 (12): 28–32. Zhang Huaiqing, Ju Hongbo, Chen Yongfu, et al. 2007. Study on dust monitoring technology using lidar [J]. Scientia Silvae Sinicae (in Chinese), 43 (12): 28–32.
- 张金业. 2010. 武汉上空对流层大气气溶胶 Raman/Mie 激光雷达探测研究 [D]. 武汉大学博士学位论文. Zhang Jinye. 2010. Study of tropospheric aerosols over Wuhan based on a Raman/Mie Lidar [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Wuhan University.
- 张军华, 王美华, 毛节泰. 2000a. 多波段光度计遥感气溶胶误差分析及订正 [J]. 大气科学, 24 (6): 855–859. Zhang Junhua, Wang Meihua, Mao Jietai. 2000a. Error analysis and correction for multi-wavelength sun-photometer aerosol remote sensing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (6): 855–859.
- 张军华, 刘莉, 毛节泰. 2000b. 地基多波段遥感西藏当雄地区气溶胶光学特性 [J]. 大气科学, 24 (4): 549–558. Zhang Junhua, Liu Li, Mao Jietai. 2000b. Remote sensing of aerosol optical properties with multi-spectral sun photometer in the Damxung region, Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (4): 549–558.
- Zhang Junhua, Mao Jietai, Wang Meihua. 2002. Analysis of the aerosol extinction characteristics in different areas of China [J]. Adv. Atmos. Sci., 19 (1): 136–152.
- 张军华, 斯召俊, 毛节泰, 等. 2003. GMS 卫星遥感中国地区气溶胶光学厚度 [J]. 大气科学, 27 (1): 23–35. Zhang Junhua, Si Zhaojun, Mao Jietai, et al. 2003. Remote sensing aerosol optical depth over China with GMS-5 satellite [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (1): 23–35.
- 章秋英, 牛生杰, 沈建国, 等. 2008. 半干旱区气溶胶散射特性研究 [J]. 中国沙漠, 28 (4): 755–761. Zhang Qiuying, Niu Shengjie, Shen

- Jianguo, et al. 2008. Observational study on aerosol scattering properties in semiarid area [J]. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 28 (4): 755–761.
- 章秋英, 牛生杰, 沈建国, 等. 2009. 半干旱区冬春季黑碳气溶胶吸收特性的观测研究 [J]. *中国沙漠*, 29 (1): 183–188. Zhang Qiuying, Niu Shengjie, Shen Jianguo, et al. 2009. Observational study on aerosol absorption properties in winter and spring in semiarid area [J]. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 29 (1): 183–188.
- 章文星, 吕达仁, 王普才. 2002. 北京地区大气气溶胶光学厚度的观测与分析 [J]. *中国环境科学*, 22 (6): 495–500. Zhang Wenxing, Lü Daren, Wang Pucui. 2002. The observation and analysis of atmospheric aerosol optical thickness over Beijing Area [J]. *China Environmental Sciences* (in Chinese), 22(6): 495–500.
- 张莹, 孙照渤. 2010. 中国中东部 MODIS 与 MISR 气溶胶光学厚度的对比 [J]. *气象科学*, 30 (1): 48–54. Zhang Y, Sun Z. 2010. Comparison of MODIS and MISR aerosol optical thickness over east-central China [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 30 (1): 48–54.
- 张玉洁, 张武, 陈艳, 等. 2008. 黄土高原半干旱地区气溶胶光学厚度变化特征的初步分析 [J]. *高原气象*, 27 (6): 1416–1422. Zhang Yujie, Zhang Wu, Chen Yan, et al. 2008. A preliminary analysis of AOD's variation characteristic in semi-arid region of Chinese loess plateau [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 27 (6): 1416–1422.
- 张园明. 2009. 微脉冲激光雷达飞行实验研究 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文. Zhang Yuanming. 2009. Research of the flight experiment of micro-pulse lidar [D]. M. S. thesis (in Chinese), Ocean University of China.
- 赵柏林, 余小鼎. 1986. 海洋大气气溶胶光学厚度的卫星遥感研究 [J]. *科学通报*, 21: 1645–1649. Zhao Bolin, Yu Xiaoding. 1986. A study of satellite remote sensing of atmospheric aerosol optical depth over ocean [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 21: 1645–1649.
- 赵柏林, 王强, 毛节泰, 等. 1983. 光学遥感大气气溶胶和水汽的研究 [J]. *中国科学 (B)*, 10: 951–962. Zhao Bolin, Wang Qiang, Mao Jietai, et al. 1983. Study on optical remote sensing of atmospheric aerosol and water vapor [J]. *Science in China (Ser. B)* (in Chinese), 10: 951–962.
- Zhao F S, Li Z Q. 2007. Estimation of aerosol single scattering albedo from solar direct spectral radiance and total broadband irradiances measured in China [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D22S03, doi:10.1029/2006JD007384.
- 赵秀娟, 张小玲, 蒲维维, 等. 2011. 气象条件对上甸子地区气溶胶散射特征的影响 [J]. *环境科学*, 32 (11): 3153–3159. Zhao X J, Zhang X L, Pu W W, et al. 2011. Effect of weather condition on the aerosol scattering property at Shangdianzi [J]. *Environment Sciences* (in Chinese), 32 (11): 3153–3159.
- 赵燕曾, 陶丽君, 郝南军. 1980. 激光探测斜视能见度的初步实验 [J]. *大气科学*, 4 (2): 168–175. Zhao Yanzeng, Tao Lijun, Hao Nanjun. 1980. [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 4 (2): 168–175.
- 赵玉成, 德力格尔, 蔡永祥, 等. 2008. 西宁地区大气中黑碳气溶胶浓度的观测研究 [J]. *冰川冻土*, 30 (5): 789–794. Zhao Yucheng, Deli Ge'er, Cai Yongxiang, et al. 2008. Variation of black-carbon aerosol concentration observed in Xining [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 30 (5): 789–794.
- 郑卓云, 陈良富, 郑君瑜, 等. 2011. 高分辨率气溶胶光学厚度在珠三角及香港地区区域颗粒物监测中的应用研究 [J]. *环境科学学报*, 31 (6): 1154–1161. Zheng Zhuoyun, Chen Liangfu, Zheng Junyu, et al. 2011. Application of retrieved high-resolution AOD in regional PM monitoring in the pearl river delta and Hongkong region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 31 (6): 1154–1161.
- 钟志庆, 周军, 戚福第, 等. 2003. 探测大气气溶胶消光系数的便携式米散射激光雷达 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15 (12): 1145–1147. Zhong Zhiqing, Zhou Jun, Qi Fudi, et al. 2003. Portable mie lidar for monitoring atmospheric aerosol extinction [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (in Chinese), 15 (12): 1145–1147.
- 周碧, 张镭, 曹贤洁, 等. 2011. 利用激光雷达资料分析兰州远郊气溶胶光学特性 [J]. *高原气象*, 30 (4), 1011–1017. Zhou Bi, Zhang Lei, Cao Xianjie, et al. 2011. Analyses on atmospheric aerosol optical properties with lidar data in Lanzhou suburb [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 30 (4): 1011–1017.
- 周军, 岳古明, 金传佳, 等. 2000. 探测对流层气溶胶的双波长米氏散射激光雷达 [J]. *光学学报*, 20 (10): 1412–1417. Zhou Jun, Yue Guming, Jin Chuanjia, et al. 2000. Two-wavelength mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol [J]. *Acta Optica Sinica* (in Chinese), 20 (10): 1412–1417.
- Zhou M Y, Chen Z, Huang R H, et al. 1994. Effects of two dust storms on solar radiation in the Beijing–Tianjin area [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 21 (24): 2697–2700.
- 周诗健, 陶丽君, 朱文琴. 1981. 几种激光探测大气消光系数方法的比较 [J]. *大气科学*, 5 (4): 444–449. Zhou Shijian, Tao Lijun, Zhu Wenqin. 1981. Comparison among several methods for lidar probing of atmospheric extinction coefficient [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 5 (4): 444–449.
- 朱爱华, 李成才, 刘桂青, 等. 2004. 北京地区 MODIS 卫星遥感气溶胶资料的检验与应用 [J]. *环境科学学报*, 24 (1): 86–90. Zhu Aihua, Li Chengcai, Liu Guiqing, et al. 2004. Validation and application of MODIS remote aerosol information in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 24 (1): 86–90.
- 朱崇抒, 曹军骥, 刘随心. 2006. 西安大气黑碳气溶胶的观测和分析 [J]. *过程工程学报*, (S2): 10–14. Zhu Chongshu, Cao Junji, Liu Suixin. 2006. Measurement and analysis of black carbon aerosol in Xi'an [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering* (in Chinese), (S2): 10–14.
- 朱厚玲. 2003. 我国地区黑碳气溶胶时空分布研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文. Zhu Houling. 2003. The study on the temporal and spatial distribution of black carbon aerosol in China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- 宗雪梅. 2006. 中国陆地上空气溶胶光学厚度遥感方法及其应用 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Zong Xuemei. 2006. Development of methods of retrieving atmospheric aerosol optical depth over China and its application [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.