

杨溯, 石广玉, 段云霞, 等. 2012. 天空辐射计观测 2006 年春季北京地区气溶胶光学特性的研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (1): 20-28, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10012. Yang Su, Shi Guangyu, Chen Lin, et al. 2012. A Study on Beijing aerosol optical properties in spring 2006 by skyradiometer measurements [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (1): 20-28.

天空辐射计观测 2006 年春季北京地区 气溶胶光学特性的研究

杨溯^{1,2,3} 石广玉¹ 段云霞⁴ 徐娜⁵ 陈林⁵ 戴铁^{1,2} 陈兵^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 国家气象信息中心, 北京 100081

4 沈阳市气象台, 沈阳 110168

5 国家气象卫星中心, 北京 100081

摘要 利用 2006 年 3~5 月天空辐射计观测数据反演得到北京地区春季大气气溶胶光学性质参数, 包括大气气溶胶光学厚度 ($0.5 \mu\text{m}$)、Angström 指数、单次散射反射比和粒子谱分布特征。结果表明: 北京地区春季气溶胶平均光学厚度 0.67, Angström 指数 0.54, 单次散射比 0.88, 粒子吸收性质较弱, 粒子谱呈双峰形, 以粗粒子为主, 粗、细模态粒子粒径分别集中在 $0.17 \mu\text{m}$ 和 $7.7 \mu\text{m}$ 左右。相比 2004 年此次观测期间气溶胶粒径较大, 粒子体积浓度较高, 散射作用在其消光特性中的比重略有下降。光学厚度日变化呈单峰型, 日间单次散射比随时间逐渐递减, Angström 指数在上午递减趋势明显, 午后变得稳定。对同时观测的天空辐射计与 CE-318 不同波长光学厚度结果进行比较, 结果显示两者得到的光学厚度相关性很好, 各波长小时平均结果的相对误差小于 7%。

关键词 气溶胶特性 天空辐射计 北京

文章编号 1006-9585 (2012) 01-0020-09 **中图分类号** P422.1 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10012

A Study on Beijing Aerosol Optical Properties in Spring 2006 by Skyradiometer Measurements

YANG Su^{1,2,3}, SHI Guangyu¹, DUAN Yunxia⁴, XU Na⁵,
CHEN Lin⁵, DAI Tie^{1,2}, and CHEN Bing^{1,2}

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *National Meteorological Information Centre, Beijing 100081*

4 *Shenyang Meteorological Service, Shenyang 110016*

5 *National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081*

收稿日期 2010-01-22 收到, 2011-10-30 收到修定稿

资助项目 气溶胶直接辐射效应 2006CB40370, 亚地区气候变化的云、气溶胶、辐射地基观测研究 2009DFA22650

作者简介 杨溯, 男, 1983 年出生, 博士研究生, 研究方向为大气辐射与气溶胶。E-mail: yangsu@cam.gov.cn

通讯作者 石广玉, E-mail: shigy@mail.iap.ac.cn

Abstract A ground-based skyradiometer was used to measure the direct and diffuse solar irradiances, as well as aureole radiances, from Mar to May 2006 over Beijing. The aerosol optical depth (AOD), Angström exponent (α), Single Scattering Albedo (SSA), and volume size distributions of aerosols were retrieved. The results indicated that the mean aerosol optical depth at $0.5 \mu\text{m}$ [AOD ($0.5 \mu\text{m}$)], Angstrom exponent, and SSA ($0.5 \mu\text{m}$) in spring over Beijing were 0.67, 0.536, and 0.876, respectively. The aerosol volume size distributions presented a bimodal structure: A coarse mode with a radius of about $7.7 \mu\text{m}$ and a fine mode with a radius of about $0.17 \mu\text{m}$, and the latter volume concentration is higher. Compare with the results of 2004, the volume of coarse particles was higher which caused by frequently dust storm in 2006 and the SSA was lower which meant higher percentage of absorptive particles. The diurnal variability of AOD was controlled by human activity and air turbulence which reached the peak value from 1100 LST to 1400 LST. The single scattering and Angström exponent was decrease with time, which indicated that the anthropogenic aerosol was weak scattering and the coarse mode particle number was growing in day time. The difference between skyradiometer and CE-318 was less than 7% for the AOD.

Key words aerosol property, skyradiometer, Beijing

1 引言

气溶胶在地气系统中扮演着重要的角色, 不仅可以吸收、散射太阳辐射影响地气系统辐射平衡, 还能改变云的微物理性质进而影响云的辐射、大小和生命周期, 它对气候变化的影响不可忽略 (IPCC, 2007)。气溶胶的时空分布差异很大, 其产生、输送、消亡及中间涉及的化学、微物理过程仍有极大的不确定性。如何获得气溶胶的宏、微观特性既是气溶胶辐射、气候效应研究也是全球气候模拟和未来气候预测研究的难题。

正因如此近十年来全球的科学家们从事了大量地面观测研究。虽然气溶胶地面观测在空间代表性上有一定缺陷, 但其丰富的信息含量, 相对成熟的反演理论使其在气溶胶研究中具有不可替代的作用 (夏祥鳌等, 2005), 它不仅为气溶胶的气候效应研究提供依据, 也为卫星资料反演、数值试验结果提供判定标准, 是非常重要的研究手段。中国学者在 20 世纪 80 年代初期开始大气气溶胶光学特性的观测研究, 赵柏林等 (1983)、毛节泰等 (1983) 等利用多波段太阳光度计进行气溶胶观测, 邱金桓 (1995)、罗云峰等 (2001, 2002)、Qiu (2003) 等用宽带消光法从宽波段太阳辐射资料得到长时期的气溶胶光学厚度。

当前地基太阳光度计遥感在观测反演原理和方法等方面有了长足发展, 已经开发出适合于反演算法的快速准确的辐射传输理论和反演模式 (吕达仁等, 1981; Shi, 1981; Qiu and Zhou,

1986); 设计出小巧、易操作的观测仪器 (Holben et al., 1998); 开发出成熟的自动除云程序, 很大程度上避免了云的干扰 (Smirnov et al., 2000; Khatri and Takamura, 2009); 能够结合太阳直接和散射辐射共同反演气溶胶光学特性、尺度谱、折射指数等参数 (Nakajima et al., 1996; Dubovik and King, 2000); 在典型气候区域建立综合观测站, 其中 Skynet、Aeronet 等都是现今著名的地面气溶胶观测项目, 积累了大量宝贵的观测数据 (夏祥鳌等, 2005; Xia et al., 2006; Takamura et al., 2007; Che et al., 2008)。

北京地处我国华北平原, 为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候, 每年春季都是沙尘频发的季节, 是我国受沙尘侵害较严重的城市。自公元 440 年开始就有强沙尘暴的记录, 在历史上先后经过了北魏、辽金和明清时期等几个沙尘暴的频发期 (尹晓惠等, 2007)。延昊等 (2002) 和 Zhang et al. (2003) 分别通过卫星和地面观测资料的研究发现, 北京正处于我国沙尘输送路径上。因此春季在北京进行气溶胶地面观测可以为进一步认识沙尘粒子对本地气溶胶光学、物理特性的影响及其产生的辐射效应提供科学依据, 对分析沙尘输送过程涉及的大气过程也有一定参考价值。本文利用安装在北京中国科学院大气物理研究所楼顶上的一台 Pom-02 型多波段天空辐射计观测数据, 根据 Nakajima et al. (1996) 提出的反演方法获得大气气溶胶光学厚度、单次散射反射比、气溶胶粒子谱分布、Angström 波长指数等光学特性参数, 研究了 2006 年北京地区春季大气气溶胶光

学、物理性质。

2 仪器和资料介绍

本研究采用日本 Prede 公司的天空辐射计 (POM-02)。它由多波段太阳、天空辐射计、太阳追踪单元、控制单元、降水感应单元等组成, 观测视场角 1° , 可以同时观测多个波段天空散射辐射和太阳直接辐射。表 1 给出了天空辐射计观测波长, 其中 $0.94 \mu\text{m}$ 用于探测水汽, $1.60 \mu\text{m}$ 和 $2.20 \mu\text{m}$ 用于云检测, 最终获得前 7 个波长的气溶胶信息。仪器通过气溶胶前向散射和直射辐射的比值对传感器校标 (O'Neill and Miller, 1984; Tanaka et al., 1986)。

表 1 天空辐射计 (POM-02) 与 CE-318 仪器波长设置对比

Table 1 Comparison of wavelengths of skyradiometer POM-02 and CE-318 μm

通道	天空辐射计波长	CE-318 波长
Ch1	0.34	0.44
Ch2	0.38	0.675
Ch3	0.4	0.87
Ch4	0.5	0.94
Ch5	0.67	1.02
Ch6	0.87	0.87P1
Ch7	0.94	0.87P2
Ch8	1.02	0.87P3
Ch9	1.225	
Ch10	1.6	
Ch11	2.2	

注: P1, P2, P3 为 3 个极化通道。

本文所用的资料时段从 2006 年 3 月到 2006 年 5 月, 观测地点位于中国科学院大气物理研究所楼顶 (39.16°N , 116.12°E), 观测期间有多次沙尘过程。资料反演采用 Nakajima et al. (1996) 提出的方案, 并采用日本千叶大学开发的除云方案进行处理 (Khatri and Takamura, 2009), 最终获得有效数据共计 1235 组, 每组数据包括 Angström 指数, 各波长气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD)、单次散射比 (SSA) 和 20 个粒子尺度上体积浓度。

3 结果与讨论

3.1 北京春季气溶胶光学和物理性质统计特征

3.1.1 气溶胶光学厚度和 Angström 指数

表 2 给出了 $0.5 \mu\text{m}$ 波长光学厚度 (AOD) 和 Angström 指数日平均值的变化特征。北京地区春季平均 AOD 为 0.67, 日变化较大, 期间最大日平均 AOD 为 1.75 出现在 5 月 3 日, 最小值 0.13 出现在 5 月 10 日, 有 7 天日平均 AOD 大于 1.5。观测期间平均 Angström 为 0.53, 说明北京地区春季粗粒子较多, 最小值 0.03 出现在 4 月 23 日, 最大值 1.04 出现在 5 月 13 日, 共有 8 天日平均 Angström 指数小于 0.3, 出现的时期都集中在 3~4 月。值得注意的是这些较小的 Angström 所对应的 AOD 几乎都小于平均水平, 查看其对应的单次散射比发现日均值均小于观测平均水平, 并有明显的随波长递增趋势, 说明此时气溶胶数浓度较低, 气溶胶中粗粒子的质量比较大, 但其数密度较小, 单次散射比有明显的随波长增加趋势, 气溶胶表现出以细粒子 (城市气溶胶) 为主的消光特征。进入 5 月, Angström 指数要高于平均水平并有逐渐增大的趋势。车慧正等 (2007) 曾利用 2003~2004 年北京地区天空辐射计的资料分析了当年北京地区气溶胶特性, 与本文结果相比, 2006 年春季北京地区 AOD 较大, Angström 指数较小, 这与 2006 年有多次强沙尘天气经过北

表 2 2006 年春季北京气溶胶光学性质统计特征

Table 2 Statistic table of Beijing aerosol optical property in spring 2006

	AOD($0.5 \mu\text{m}$)	SSA($0.5 \mu\text{m}$)	Angström
观测期间均值	0.67	0.87	0.53
观测期间最大日均值	1.75	0.92	1.04
观测期间最小日均值	0.13	0.79	0.03
25%分位值	0.31	0.86	0.30
50%分位值	0.54	0.88	0.58
75%分位值	0.89	0.9	0.73
2004 年春季北京观测 (车慧正等, 2007)	0.54	0.92	0.80
2004 年春季银川观测 (刘建军等, 2009)	0.36	0.92	0.47

京有关 (李小龙和方宗义, 2007)。频繁的沙尘天气给北京地区输送了大量粗粒子, 气溶胶消光特性增强, 光学厚度增加, 粗粒子在气溶胶中的比重增加, 引起 Angström 指数减小。与刘建军等 (2009) 2004 年在银川的观测比较, Angström 指数相近, 气溶胶都以粗粒子为主, 北京地区的光学厚度近似为银川的两倍, 这与北京地区较银川人口稠密、工商业发达、沙尘天气频繁等多个因素有关。

图 1 是光学厚度和 Angström 指数的散点图, 从图上看随着光学厚度增加, Angström 指数可能出现的最大值在逐渐减小, 说明大粒子是引起高光学厚度的主要因素, 这与北京地区春季频繁的沙尘天气有直接关系; 当 Angström 指数大于 1.0 时, AOD 均小于 0.3, 它表示大气中粗粒子明显下降气溶胶以细粒子为主, 此时大气非常洁净; 当 AOD < 0.3 时, Angström 指数可以在 0~1.4

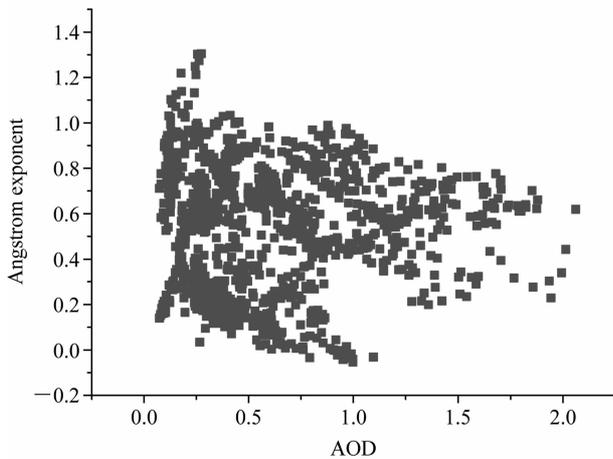


图 1 2006 年春季北京地区每小时光学厚度与 Angström 指数散点图

Fig. 1 Scatterplot of hourly Aerosol Optical Depth (AOD) at 0.5 μm and Angström exponent in Beijing in spring 2006

之间变化, 这可能由两方面原因引起: (1) 北京地区春季清洁大气中粒子类型有多种可能, 粒子成分复杂; (2) AOD 值较小时观测引起的误差在计算 Angström 指数时被放大可能掩盖真值, 造成 Angström 指数分布范围较大。结合 $0.3 < AOD < 0.8$ 区间, Angström 指数指数在 $-0.1 \sim 1.0$ 之间分布, 可以确认北京地区气溶胶粒子类型多样是引起 Angström 指数分布范围较广的原因之一。综上所述可知北京地区春季气溶胶来源复杂, 各种类型的气溶胶表现都有不同的光学性质, 沙尘是重要的气溶胶类型, 也是引起高光学厚度的主要因素。

3.1.2 气溶胶单次散射比

单次散射比是估计气溶胶直接辐射效应的重要参数, 定义为散射系数与消光系数的比值, 反映了气溶胶粒子的散射辐射能力, 主要取决于气溶胶的尺度分布和物理化学组成。北京地区春季气溶胶散射特性较强, 平均单次散射比 0.87, 日变化很小。观测期间最大值 0.92 出现在 4 月 2 日, 最小值 0.79 出现在 4 月 23 日, 共有 7 天单次散射比小于 0.86。虽然 2006 年北京春季有多次强沙尘暴过程, 但本文反演的 2006 年北京春季单次散射比的值要明显低于部分学者 (Kaufman et al., 2001; Dubovik et al., 2002) 研究纯沙尘气溶胶特性得到的单次散射比的值 (0.95~0.99), 表明北京地区气溶胶里还混合了城市气溶胶、生物燃烧气溶胶等其他吸收性质的气溶胶类型。与 2004 年北京和银川的观测结果相比, 此次得到的单次散射比较低, 说明气溶胶中混合的其他成分增加了 (见表 2)。

表 3 列出了 7 个波长平均单次散射比, 可以看到单次散射比随波长变化很小, 尤其在可见光波段几乎没有变化, 近红外波段单次散射比值略

表 3 2006 年春季北京地区散射特性较弱大粒子观测记录

Table 3 Observational record of weak scattering coarse mode particles in Beijing in spring 2006

	AOD		SSA						
	(0.5 μm)	α	0.34 μm	0.38 μm	0.40 μm	0.50 μm	0.67 μm	0.87 μm	1.02 μm
观测期间平均	0.670	0.536	0.875	0.876	0.876	0.876	0.878	0.884	0.890
3 月 25 日	0.591	0.127	0.789	0.795	0.798	0.810	0.830	0.850	0.863
4 月 7 日	0.417	0.124	0.812	0.818	0.821	0.834	0.852	0.871	0.883
4 月 23 日	0.766	0.035	0.766	0.774	0.778	0.796	0.821	0.844	0.858

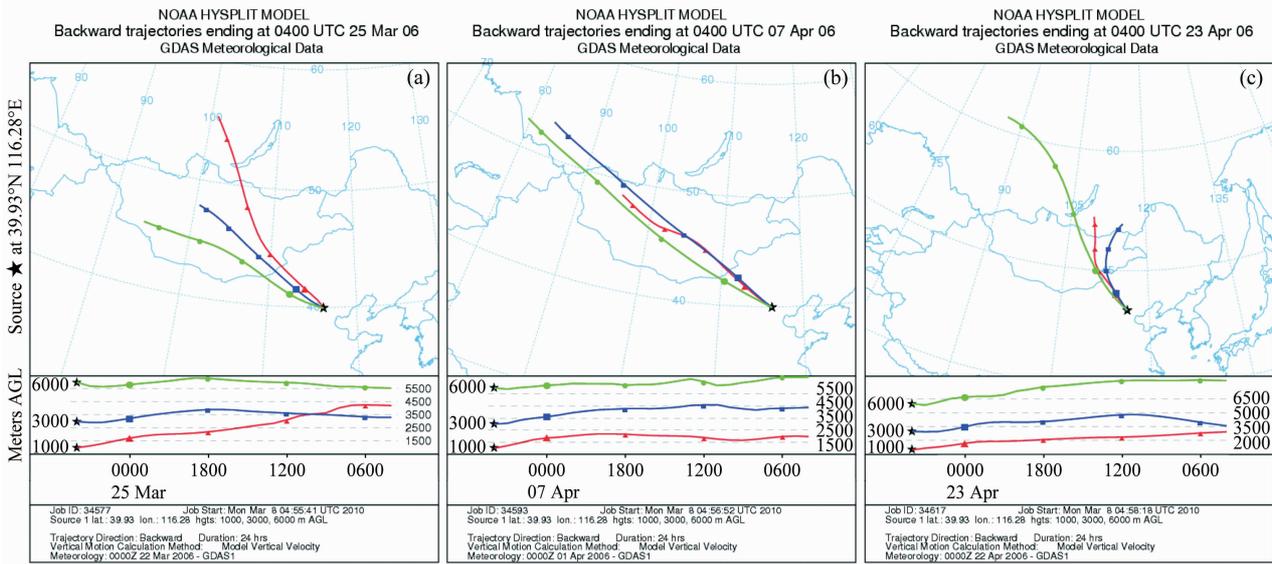


图2 24小时后向轨迹图：(a) 3月25日；(b) 4月7日；(c) 4月23日
Fig.2 24-h backward trajectory: (a) 25 Mar; (b) 7 Apr; (c) 23 Apr

大。夏祥鳌等（2005）利用2001年北京CE-318的观测资料研究我国北方春季气溶胶特性，研究表明人为污染气溶胶的单次散射比随波长明显下降，混合气溶胶的单次散射反射比基本不随波长变化，北京地区单次散射比基本不随波长变化，这与本文得到的结果非常一致。

3月25日、4月7日、4月23日气溶胶的光学特性比较特殊。从表2可以看到这3天单次散射比值均低于观测期间平均水平且表现出显著的光谱特性，可见光波段的值小于近红外波段，说明气溶胶对可见光波段散射较弱。同时日平均Angström指数很小，查看这3天气溶胶体积谱发现气溶胶以粗粒子为主，体积谱呈单峰形，细模态粒子数与粗模态粒子数相差1~2个数量级，尤其在4月23日，粗模态粒子体积浓度为 $8.42 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2}$ ，远高于春季平均水平，而日平均单次散射比却为观测期间最小值。结合NOAA研制的HYSPLIT4 (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated) (Draxler, 1997) 的后向轨迹方法分析这3日到达北京地区的1 km、3 km、6 km高度气团来源，结果表明这3日到达北京上空的气流均由蒙古国进入我国境内，经由内蒙古到达观测点，途径亚洲重要的沙尘源区且气流移动速度快，因此会有大量的沙尘粒子进入气团，粗粒子在气溶胶中占主导。气流在到达北京地区

前均经过张家口市，这表明会有吸收性较强的城市气溶胶进入气团引起气溶胶吸收特性增强，单次散射比下降，并且这部分气溶胶在整个气团中比重较小，不足以引起Angström指数向细粒子方向偏移，由此就引起气溶胶单次散射比与Angström指数较特殊的现象。

3.1.3 气溶胶谱分布

我们反演了 $10^{-6} \sim 2 \times 10^{-2} \text{ cm}$ 半径范围内的20个粒子尺度上的气溶胶体积分布，图3是观测期间气溶胶粒子体积谱图。可以看到北京春季气

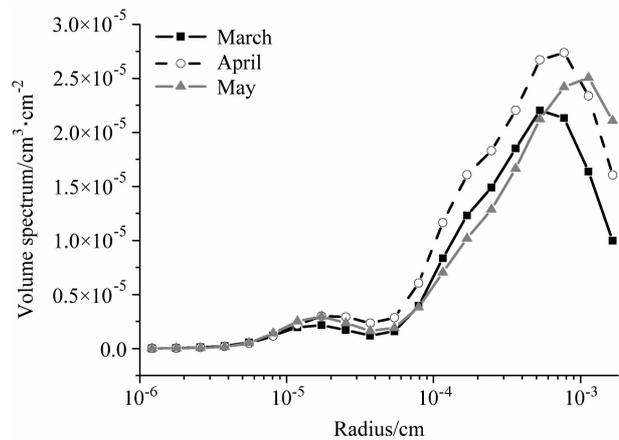


图3 2006年春季北京地区各月20个不同尺度上气溶胶体积谱
Fig.3 Monthly averages of the aerosol volume spectrum at 20 different radii in Beijing in spring 2006

溶胶体积谱呈双峰分布，细模态粒子半径集中在 $0.17 \mu\text{m}$ ，体积浓度在 $2.9 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2}$ 左右，与 2004 年同期的体积浓度水平相近；粗模态粒子半径集中在 $7.73 \mu\text{m}$ ，体积浓度在 $2.7 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2}$ 左右，粗细模态粒子浓度差一个数量级，与 2004 年相比粗粒子浓度增加了。3 个月中，4 月的粒子浓度要高于其他 2 个月。

3.2 北京春季气溶胶光学和物理性质日变化

图 4 是 2006 年北京春季 AOD ($0.5 \mu\text{m}$)、Angström 指数和 $0.5 \mu\text{m}$ 单次散射比日变化图。可以看到 AOD 日变化呈单峰形，07 时（北京时间，下同）至 10 时持续增长，11 时至 14 时光学厚度比较稳定，期间出现日最大值，15 时至 17 时持续下降，日变化幅度较大，日最小值出现在 07 时。AOD 的日变化明显受人为活动和大气湍流扩散规律控制。日出后人为活动增加，尤其在早晨 07 至 08 时交通高峰，地面气溶胶浓度快速增加，此时地面开始吸收太阳辐射温度升高，边界层开始抬升，地面湍流变得活跃有助于地面气溶胶向对流层输送。在源和大气湍流输送共同作用下大气中气溶胶柱含量增加。14 时之后地面温度开始下降，湍流渐弱，虽然此时地面源的变化不大，但从地面输送的气溶胶减少了，AOD 开始减小直到观测结束。

单次散射比日变化随时间逐渐递减，表明日

间释放人为气溶胶进入大气后减弱了气溶胶的散射特性在消光系数中的比重。表 4 给出了 7 个波长单次散射比日变化值，可以看到各个波长的日变化趋势非常一致，日变化幅度随波长递减，表明日间释放的人为气溶胶对可见光波长的辐射影响较大。日间单次散射比随波长变化的特征可分为 2 个时段：07 时至 11 时随波长小幅递减，表现出人为气溶胶的特性，这种特性随时间逐渐减弱，12 时至 17 时单次散射比近似不随波长变化，表现出混合气溶胶的特性。

Angström 指数的日变化与单次散射比较相像，07 时至 11 时指数递减较快，11 时至 16 时比较稳定，日最大值在 07 时，最小值在观测结束。7 时至 11 时光学厚度快速增长，地面增加的气溶胶以人为气溶胶为主，粒径主要集中在细粒子段，而此时 Angström 递减的幅度很大，表示此时大气中粗粒子的比重在增加。结合粒子谱日变化图发现，粗、细模态粒子在 07 时至 08 时增长都非常迅速，这种增长与交通高峰有关；08 时至 10 时细模态粒子体积浓度比较稳定，粗模态粒子继续增长，这种仅粗模态粒子浓度增长的现象可能与沙尘输送、气粒转换、粒子碰并等多种大气过程有关。11 时之后 Angström 指数的变化不大，表明大气中粗细粒子的比重趋于稳定。

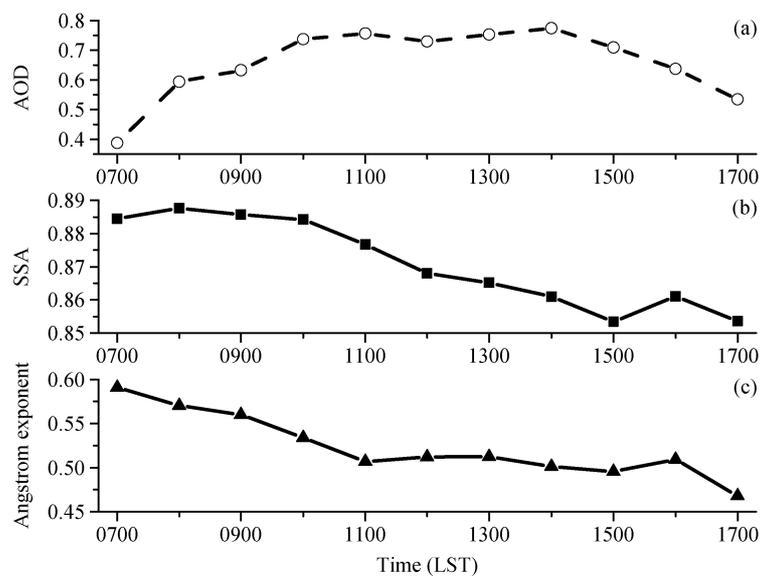


图 4 2006 年北京春季 (a) 气溶胶光学厚度 AOD ($0.5 \mu\text{m}$)、(b) 单次散射比 SSA ($0.5 \mu\text{m}$) 和 (c) Angström 指数日变化
Fig. 4 Diurnal variation of (a) AOD ($0.5 \mu\text{m}$), (b) SSA ($0.5 \mu\text{m}$), and (c) Angström exponent in Beijing in spring 2006

表 4 各波长单次散射比 SSA 日变化
Table 4 Diurnal variation of single scattering for seven wavelengths

	0.34 μm	0.38 μm	0.4 μm	0.5 μm	0.67 μm	0.87 μm	1.02 μm
07 时	0.913	0.911	0.909	0.903	0.895	0.895	0.899
08 时	0.899	0.896	0.895	0.887	0.880	0.881	0.885
09 时	0.902	0.899	0.898	0.891	0.884	0.885	0.889
10 时	0.901	0.898	0.896	0.889	0.880	0.879	0.882
11 时	0.885	0.883	0.881	0.876	0.870	0.871	0.875
12 时	0.878	0.875	0.874	0.867	0.861	0.862	0.867
13 时	0.871	0.868	0.866	0.860	0.854	0.856	0.861
14 时	0.867	0.866	0.865	0.860	0.857	0.861	0.867
15 时	0.854	0.853	0.852	0.849	0.848	0.855	0.862
16 时	0.850	0.848	0.847	0.844	0.845	0.851	0.859
17 时	0.844	0.843	0.843	0.840	0.841	0.848	0.856
日变化	0.069	0.068	0.066	0.063	0.054	0.047	0.043
日变化幅度	7.56%	7.46%	7.26%	6.98%	6.03%	5.25%	4.78%

3.3 天空辐射计与 CE-318 光学厚度对比

天空辐射计和 CE-318 是当前使用最广泛的地面气溶胶观测仪器，它们通过观测太阳直接、散射辐射得到气溶胶光学参数。两套仪器采用完全不同的观测原理，因此验证它们得到的光学参数是否一致成了非常必要的工作。光学厚度是地基遥感最重要的产品之一，对比两套仪器光学厚度的结果是评价它们一致性非常直接的途径。本文比较了 2006 年春季中国科学院大气物理所楼顶两套仪器 4 个波长 (1.02、0.87、0.675、0.5 μm) 小时平均光学厚度。两套仪器仅 1.02、0.87 μm 波长一致 (见表 1)，其余两个波长的光学厚度根据方程 (1)，(2) 得到。

$$\tau_{0.5} = \tau_{0.87} \cdot \left(\frac{0.87}{0.5}\right)^{-\alpha_{0.87-0.5}}, \quad (1)$$

$$\tau_{0.675} = \tau_{0.67} \cdot \left(\frac{0.67}{0.675}\right)^{-\alpha}. \quad (2)$$

方程 (1) 中 $\alpha_{0.87-0.5}$ 为 CE-318 提供的 0.87 μm 与 0.5 μm 波长的 Angström 指数，方程 (2) 中 α 为天空辐射计得到的各波长拟合的 Angström 指数。图 5 是各波长光学厚度对比图，从图中可以看到天空辐射计与 CE-318 得到的各波长光学厚度相关性很好，拟合优度 $R^2 > 0.97$ ，各波长平均相对误差 ($\delta_\lambda = \tau_{\text{skyradiometer},\lambda} / \tau_{\text{skyradiometer},\lambda}$) 分别为 6.4%，4.0%，4.4%，6.9% (0.5、0.67、0.87、1.02 μm)。0.5 μm 波长的结果离散程度略高于其它 3 个波长，这与 CE-318 本身没有 0.5 μm 波长直接

观测，其结果是从其他波长反演出来有关。以上结果表明，虽然两套仪器观测和反演的方法不同，但得到的 AOD 结果还是非常一致的。

4 结论

根据 2006 年 3~5 月天空辐射计观测的资料得到北京地区春季气溶胶 AOD、Angström 指数、体积谱分布、单次散射比等光学和物理特征。结果表明北京地区春季气溶胶气溶胶来源复杂，各种类型的气溶胶表现都有不同的光学性质，沙尘是重要的气溶胶类型，也是引起高光学厚度的主要因素，气溶胶谱以粗粒子为主，粒子在可见和近红外波段的散射特性较强，单次散射比几乎不随波长变化。相比之前的研究，本次观测的 AOD 略大、Angström 指数较小，这与 2006 年春季北京地区有多次沙尘过境有关；单次散射比小于以往结果，表明大气中吸收性粒子比重增加了。观测期间有单次散射比、Angström 指数、AOD 较小而粗粒子体积浓度较大并且单次散射比表现出较强的谱特性的观测记录出现，这不仅与北京地区气溶胶成分还与气流输送路径有关。AOD 日变化有明显的单峰特征，最大值出现在 11 时至 14 时，日变化规律有明显受人为活动和大气热湍流扩散控制的特征；各个波长单次散射比都随时间递减，表明日间释放人为气溶胶有一定吸收性，

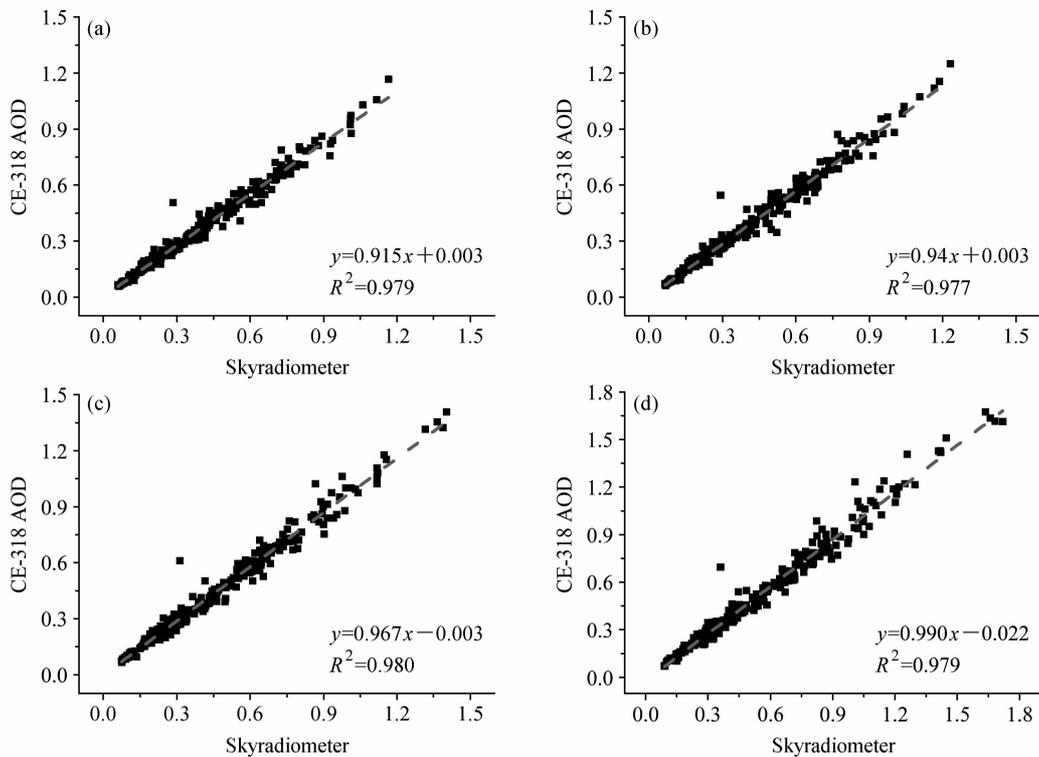


图 5 天空辐射计与 CE-318 4 个波长光学厚度结果散点图：(a) 1.02 μm ；(b) 0.87 μm ；(c) 0.67 μm ；(d) 0.5 μm
Fig. 5 Scattergrams of AOD between skyradiometer and CE-318 at wavelengths of (a) 1.02 μm , (b) 0.87 μm , (c) 0.67 μm , and (d) 0.5 μm over Beijing

进入大气减弱了气溶胶的散射特性，表现出混合型气溶胶的特征。粗粒子的比重在日间有逐渐增加的趋势，这与沙尘输送、气粒转换、粒子碰并等多种大气过程有关。本文比较了同一观测时段不同波长天空辐射计与 CE-318 光学厚度，两者得到的光学厚度相关性很好，各波长小时平均结果的相对误差小于 7%。

致谢 感谢日本“OpenCLAS2TR”项目为本文提供反演模式，感谢日本千叶大学 Takamura 教授、Pradeep 博士为模式运行提供的帮助，感谢陈丽琼老师在仪器维护方面给予的大力支持。感谢中国科学院大气物理所和 Aeronet 提供的 CE-318 观测资料。

参考文献 (References)

车慧正, 石广玉, 张小曳. 2007. 北京地区大气气溶胶光学特性及其直接辐射强迫的研究 [J]. 中国科学院研究生院学报, 24 (5): 699 - 704. Che Huizheng, Shi Guangyu, Zhang Xiaoye. 2007. Aerosol optical characteristics and its direct radiative forcing in Beijing [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 24 (5): 699 - 704.

Che Huizheng, Shi Guangyu, Uchiyama A, et al. 2008. Intercomparison between aerosol optical properties by a PREDE skyradiometer and CIMEL sunphotometer over Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 8: 3199 - 3214.

Draxler R R. 1997. Description of the HYSPL IT_4 Modeling System [R]. NOAA Technical Memorandum, 24.

Dubovik O, King M D. 2000. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements [J]. Journal of Geophysical Research, 105 (D16): 20673 - 20696.

Dubovik O, Holben B N, Eck T F, et al. 2002. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations [J]. J. Atmos. Sci., 59: 590 - 608.

Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. 1998. AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. Remote Sensing of Environment, 66 (1): 1 - 16.

IPCC. 2007. Climate change 2007: The Physical scientific basis [M] //Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. London: Cambridge University Press, 131 - 217.

Kaufman Y J, Smirnov A, Holben B N, et al. 2001. Baseline maritime aerosol: Methodology to derive the optical thickness and scattering properties [J]. Geophys. Res. Lett., 28: 3251 - 3254.

- Khatri P, Takamura T. 2009. An algorithm to screen cloud-a cted data for sky radiometer data analysis [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87 (1): 189 - 204.
- 刘建军, 郑有飞, 吴荣军. 2009. 银川地区气溶胶特性的天空辐射计测量 [J]. *气象学报*, 67 (3): 461 - 468. Liu Jianjun, Zheng Youfei, Wu Rongjun. 2009. Sky radiometer measurements of aerosol properties over Yinchuan, China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (3): 461 - 468.
- 李小龙, 方宗义. 2007. 2006 年两次影响北京的沙尘天气对比分析 [J]. *气候与环境研究*, 12 (3): 320 - 328. Li Xiaolong, Fang Zongyi. 2007. Comparison between two dust weather process effecting Beijing in 2006 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12 (3): 320 - 328.
- 罗云峰, 李维亮, 周秀骥. 2001. 20 世纪 80 年代中国地区大气气溶胶光学厚度的平均状况分析 [J]. *气象学报*, 59 (1): 77 - 87. Luo Yunfeng, Li Weiliang, Zhou Xiuji. 2001. Analysis of the 1980's atmospheric aerosol optical depth over China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 59 (1): 77 - 87.
- 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分析 [J]. *大气科学*, 26 (6): 721 - 730. Luo Yunfeng, Lü Daren, Zhou Xiuji, 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.
- 吕达仁, 周秀骥, 邱金桓. 1981. 消光—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): 1517 - 1523. Lü Daren, Zhou Xiuji, Qiu Jinhuan. 1981. The theory and numerical experiment of comp rehensive remote sensing of aerosol by combinati on of extincti on and forward scattering measurements [J]. *Science China (in Chinese)*, (12): 1516 - 1523.
- 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 (4): 322 - 331.
- Nakajima T, Tonna G, Rao R Z, et al. 1996. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions [J]. *Applied Optics*, 35 (15): 2672 - 2686.
- O'Neil N T, Miller J R. 1984. Combined solar aureole and solar beam extinction measurements. 1: Calibration considerations [J]. *Applied Optics*, 23: 3691 - 3696.
- 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 (Scinetia Atom-spherica Sinica) (in Chinese)*, 19 (4): 385 - 394.
- Qiu Jinheng. 2003. Broadband Extinction method to determine aerosol optical depth from accumulated direct solar radiation [J]. *J. Appl. Meteor.*, 42: 1611 - 1625.
- Qiu Jinheng, Zhou Xiuji. 1986. Simultaneous determination of aerosol size distribution and refractive index and surface Albedo from radiance. Part I: Theory [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 3: 162 - 171.
- Shi Guangyu. 1981. An accurate calculation and representation of the infrared transmission function of the atmospheric constituents [D]. Ph. D thesis, Tohoku University of Japan, 1 - 191pp.
- Smirnov A, Holben B N, Eck T F, et al. 2000. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database [J]. *Remote Sensing of Environment*, 73 (3): 337 - 349.
- Takamura T, Sugimoto N, Shimizu A, et al. 2007. Aerosol radiative characteristics at Gosan, Korea, during the atmospheric brown cloud East Asian regional experiment 2005 [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, D22S36, doi:10.1029/2007JD008506.
- Tanaka M, Nakajima T, Shiobara M. 1986. Calibration of a sun-photometer by simultaneous measurements of direct-solar and circumsolar radiations [J]. *Appl. Opt.*, 25: 1170 - 1176.
- Xia Xiang'ao, Chen Hongbin, Wang Pucui, et al. 2006. Variation of column-integrated aerosol properties in a Chinese urban region [J]. *J. Geophys. Res.*, 111, D05204, doi:10.1029/2005JD006203.
- 夏祥鳌, 王普才, 陈洪滨, 等. 2005. 中国北方地区春季气溶胶光学特性地基遥感研究 [J]. *遥感学报*, 9 (4): 429 - 437. Xia Xiang'ao, Wang Pucui, Chen Hongbin, et al. 2005. Ground-based remote sensing of aerosol optical properties over North China in spring [J]. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 9 (4): 429 - 437.
- 延昊, 王长耀, 牛铮, 等. 2002. 东亚沙尘源地、沙尘输送路径的遥感研究 [J]. *地理科学进展*, 21 (1): 90 - 96. Yan Hao, Wang Changyao, Niu Zheng, et al. 2002. Remote sensing study of tracks and source areas of eastern Asian dust [J]. *Progress in Geography (in Chinese)*, 21 (1): 90 - 96.
- 尹晓惠, 时少英, 张明英, 等. 2007. 北京沙尘天气的变化特征及其沙尘源地分析 [J]. *高原气象*, 26 (5): 1039 - 1044. Yin Xiaohui, Shi Shaoying, Zhang Mingying, et al. 2007. Change characteristic of Beijing dust weather and its sand-dust source areas [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 26 (5): 1039 - 1044.
- 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 辑)*, (10): 951 - 962. Zhao Bolin, Wang Qiang, Mao Jietai, et al. 1983. Study on remote sensing of aerosol optical depth and vapor [J]. *Science in China (Ser. B) (in Chinese)*, (10): 951 - 962.
- Zhang X Y, Gong S L, Shen Z X, et al. 2003. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE - Asia: 1. Network observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D9), 4261, doi:10.1029/2002JD002632.