

周 碧, 张 镭, 蒋德明, 等. 利用激光雷达观测资料研究兰州气溶胶光学厚度[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 666-671, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-04-0666

利用激光雷达观测资料研究兰州 气溶胶光学厚度

周 碧^{1,2}, 张 镭¹, 蒋德明², 曹贤洁¹, 隋 兵²

(1. 兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 湖南气象科学研究所, 湖南 长沙 410007)

摘 要:利用兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)2006~2011年晴空无云时激光雷达(CE-370-2)资料,结合2006年12月至2007年5月多波段太阳光度计(CE-318)资料,对比验证了激光雷达资料的反演结果,并分析了兰州地区气溶胶光学厚度的分布特征。结果表明:激光雷达反演得到的光学厚度与光度计观测得到的光学厚度,两者具有较好的相关性,相关系数为0.86。兰州地区气溶胶光学厚度3~5月和11~12月较大,主要原因是3~5月是当地沙尘频发期,11~12月是居民集中采暖期,沙尘排放和燃煤排放显著增加了大气气溶胶光学厚度。气溶胶光学厚度6~10月偏小,湿沉降清除是主要的影响因素。光学厚度季节分布为春季0.42,冬季0.36,秋季0.30,夏季0.21。光学厚度频数分布于0.0~0.3的最多,占总数的一半,且存在季节差异。兰州上空夏季干净,春季浑浊,冬季次浑浊。

关键词:激光雷达;兰州地区;气溶胶光学厚度(AOD);频数分布

文章编号:1006-7639(2013)-04-0666-06 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-04-0666

中图分类号:P407.1

文献标识码:A

引 言

大气气溶胶是影响气候变化的重要因子,也是一个很不确定的因子^[1-3]。气溶胶不仅可通过自身的散射和吸收作用直接改变地气系统辐射收支,还可作为云的凝结核,改变云的寿命和光学特性间接影响气候。此外,气溶胶吸收太阳辐射后改变大气温度层结,进而对气候产生影响。近年来,由气溶胶引起的大范围能见度下降的灰霾天气时有发生^[4-6]。气溶胶的气候效应和环境效应越来越受到大气科学和环保领域学者、专家的关注。

气溶胶引起气候变化不确定性的主要原因之一是对气溶胶光学特性缺乏充分的认识^[7-9]。激光雷达具有高分辨率、高精度、可连续性等观测优势,是探测气溶胶光学物理参数时空分布的有效手段^[10-12]。一些区域相继建立了激光雷达气溶胶观

测网,如2000年建立的European Aerosol Research Lidar Network(EARLINET,主要用于研究欧洲地区大气气溶胶对气候变化的影响及气溶胶的输送特征^[13-14];The Micro-pulse Lidar Network(MPL-NET),主要研究沙尘、烟尘、农作物燃烧物和大陆性气溶胶对云的影响,同时为星载激光雷达的检验提供参考^[15-16];Asian Dust Network(AD-NET),主要监测亚洲沙尘暴的起源和沙尘粒子的输送^[17]。我国北京、上海、广州、合肥、兰州、西安等地也设置了激光雷达观测点,主要监测沙尘和大陆性气溶胶的光学特性^[18-22]。

兰州地区处于黄土高原半干旱区,作为干旱和半湿润区过渡带,下垫面状况特殊,气候变化敏感,该区气溶胶监测点相对稀疏,是气溶胶观测研究的薄弱环节^[23-27]。兰州大学半干旱气候与环境观测站位于黄土高原半干旱区,长时间连续气溶胶观测

收稿日期:2013-07-29;改回日期:2013-10-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41075104),兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujdky-2013-bt04)及湖南省气象局短平快基金项目共同资助

作者简介:周碧(1984-)女,瑶族,湖南道县人,博士研究生,气象服务与应用气象工程师,主要从事气溶胶观测研究。E-mail:zhou07@lzu.edu.cn

对理解区域气溶胶的分布和光学特性等提供了重要的科学支撑,也为深入认识气溶胶辐射特性及区域气候效应提供重要支撑。

本文利用 SACOL 连续 5 a 时间序列激光雷达资料,反演分析兰州地区气溶胶光学厚度及频数分布特征,以获得对该地区气溶胶光学特性的宏观认识,为改进区域气候模式提供较为精准的理论依据。

1 观测试验和数据说明

兰州地区激光雷达观测试验开始于 2006 年,试验开展至今获得了大量气溶胶垂直廓线。2006 年 12 月至 2007 年 5 月激光雷达放置于 SACOL 榆中综合观测站(35.95°N,104.08°E,1 966 m),期间配合太阳光度计等多种气溶胶观测设备;其他时间设置在 SACOL 兰州城市观测站(36.05°N,103.86°E,1 525 m)。文中激光雷达数据采用晴空无云时(激光雷达上空无云)的资料,太阳光度计采用 level1.5 的数据。

观测采用的激光雷达系统(CE-370-2)由法国 Cimel 公司生产,包含发射、接受和数据采集系统,主机和望远镜通过光纤联系起来。采用 Nd:TAG 固体激光器,中心波长 532 nm,单次脉冲能量 6 μJ,激光脉冲重复频率 4.7 kHz,脉冲宽度在 15 ns 之内,相邻 2 次脉冲的间隔 212 μs,激光束视场角

55 μrad,观测盲区 195 m,空间分辨率 15 m,时间分辨率 5 min,最大探测高度 30 km。探测器采用雪崩二极管(APD),光子捕获率 55%,滤光片中心波长 532 nm,带宽 0.2 nm,透过率 0.25。激光雷达观测到的回波能量为标准距离后向散射信号。太阳光度计(CE-318)可自动跟踪扫描太阳和天空辐射,获得大气气溶胶光学厚度。

2 反演方法

激光雷达原始数据进行反演之前首先经过预处理。预处理包含探测器空载时间延时订正、背景噪音订正、后脉冲订正和低层重叠因子订正。本文采用的数据均经过了上述预处理。

Mie 散射激光雷达方程为:

$$X(z) = EC\beta(z)T^2(z) \quad (1)$$

其中 z 为粒子与激光雷达的距离, $X(z)$ 为 z 处标准距离后向散射信号, E 为激光发射脉冲能量, C 为激光雷达系统订正常数, $\beta(z)$ 后向散射系数,

$$T(z) = \exp\left[-\int_0^z \sigma(z')dz'\right] \text{ 透过率, } \sigma z \text{ 消光系数。}$$

后向散射信号可看成气溶胶和大气分子 2 部分的作用,因此,(1)式可改写成:

$$X(z) = EC[\beta_1(z) + \beta_2(z)] \exp\left\{-2\int_0^z [\sigma_1(z') + \sigma_2(z')]dz'\right\} \quad (2)$$

下标 1、2 分别代表气溶胶、大气分子。本文采用改进的气溶胶后向散射系数和消光系数反演方法,该方法建立在 Fernald 法与 Collis 法相结合的基础上,反演时引入雷达比 S (即消光系数和后向散射

系数比 $\sigma(z)/\beta(z)$),设定标定高度 Z_c (本文以 8 km 为界,可探测高度 >8 km, Z_c 取 8 km;探测高度不到 8 km, Z_c 取实际探测高度); Z_c 以下气溶胶消光系数由下式反演得到:

$$\sigma_1(z) = -\frac{s_1}{s_2} \cdot \sigma_2(z) + \frac{X(z) \cdot \exp\left[2\left(\frac{s_1}{s_2} - 1\right) \int_z^{z_c} \sigma_2(z')dz'\right]}{\frac{X(z_c)}{\sigma_1(z_c) + \frac{s_1}{s_2} \sigma_2(z_c)} + 2 \int_z^{z_c} X(z') \exp\left[2\left(\frac{s_1}{s_2} - 1\right) \int_z^{z'} \sigma_2(z'')dz''\right] dz'} \quad (3)$$

Z_c 以上气溶胶消光系数由下式反演得到

$$\sigma_1(z) = -\frac{s_1}{s_2} \cdot \sigma_2(z) + \frac{X(z) \cdot \exp\left[-2\left(\frac{s_1}{s_2} - 1\right) \int_z^{z_c} \sigma_2(z')dz'\right]}{\frac{X(z_c)}{\sigma_1(z_c) + \frac{s_1}{s_2} \sigma_2(z_c)} - 2 \int_z^{z_c} X(z') \exp\left[-2\left(\frac{s_1}{s_2} - 1\right) \int_z^{z'} \sigma_2(z'')dz''\right] dz'} \quad (4)$$

其中 S_2 为 $8\pi/3$, S_1 经过试验检验后给定, 沙尘时取 50 sr, 非沙尘时取 20 sr^[26]。大气分子消光系数由美国标准大气模式和瑞利散射计算得到^[28], 标定高度 Z_c 处气溶胶消光系数通过 Collis 法给出。

3 激光雷达反演结果对比验证

气溶胶雷达比 S_1 是 Mie 散射激光雷达方程反演气溶胶后向散射系数和消光系数的重要参数, 也是误差来源之一^[23-24]。本节利用国际标准仪器太阳光度计 (CE-318) 观测结果与激光雷达 (CE-370-2) 反演结果进行对比验证, 给出反演结果精度及可靠性分析。太阳光度计 (CE-318) 无 532 nm 气溶胶光学厚度, 因此, 采用相邻波长 440 nm 和 675 nm 气溶胶光学厚度, 利用 (5) 和 (6) 式插值得到 532 nm 气溶胶光学厚度^[29]。

$$\tau = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (5)$$

$$\alpha = (\ln \tau_1 / \tau_2) / (\ln (\lambda_1 \lambda_2)), \beta = \tau_1 / \lambda_1^\alpha \quad (6)$$

τ 为气溶胶光学厚度, β 为整层大气气溶胶数量, λ 为波长, α 为 Ångström 指数。

图 1 为激光雷达 (CE-370-2) 反演的气溶胶光学厚度与太阳光度计 (CE-318) 插值得到的光学厚度对比验证。对比验证的数据是基于激光雷达和太阳光度计的日平均数据, 对比时间段为 2006 年 12 月至 2007 年 5 月, 涵盖了晴空无云干净天气、采暖期污染较严重的天气、扬沙、浮尘、沙尘暴 5 种天气状况。反演时, 前面两者激光雷达比 S_1 取 20 sr; 后三者激光雷达比 S_1 取 50 sr。结果表明: 激光雷达反演得到的光学厚度与太阳光度计插值得到的光学厚度具有较好的相关性, 相关系数为 0.86, 方差为 0.10, 拟合直线斜率为 1.01。激光雷达反演结果略小于光度计结果, 但非常接近。激光雷达反演气

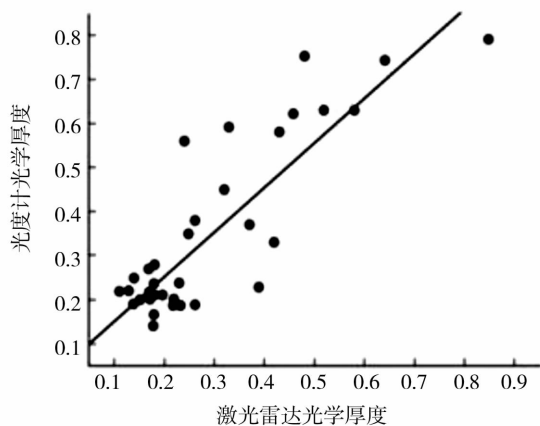


图 1 激光雷达与太阳光度计 AOD 对比

Fig. 1 Comparison of aerosol optical depth from lidar (CE-370-2) and sun photometer (CE-318)

溶胶光学厚度的精度较高, 结果可靠。

4 结果分析

4.1 光学厚度分布特征

气溶胶光学厚度是消光系数在垂直方向上的积分, 是反映气溶胶光学特性和辐射特性的重要参数。图 2 为气溶胶光学厚度的月平均分布, 气溶胶光学厚度最大值为 0.51, 分布于 2007 年 3 月; 最小值为 0.16, 分布于 2011 年 9 月。另外, 每年 3~5 月和 11~12 月气溶胶光学厚度偏大, 主要因为 3~5 月是当地沙尘频发期, 11~12 月是该区居民集中采暖期, 沙尘排放和燃煤排放显著增加了大气气溶胶的光学厚度; 每年 6~10 月气溶胶光学厚度偏小, 6~10 月是当地集中降水期, 占全年降水的 47%~64%^[30-31], 湿沉降对粒径 $> 1 \mu\text{m}$ 的气溶胶具有显著的清除作用^[32], 降水量与气溶胶质量浓度之间存在较好的负相关关系^[33], 湿沉降是导致 6~10 月气溶胶光学厚度显著降低的主要因素。

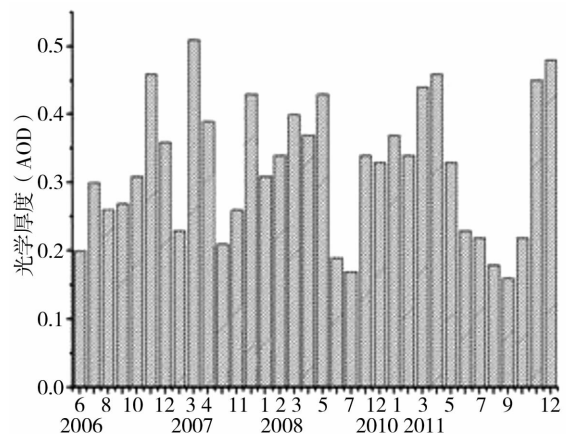


图 2 SACOL 气溶胶光学厚度月平均

Fig. 2 The monthly average of AOD at SACOL

本文春季为 3~5 月、夏季为 6~8 月、秋季为 9~11 月、冬季为 12~2 月。图 3 为气溶胶光学厚度季节平均。兰州地区气溶胶光学厚度春季最大, 为 0.42; 冬季次之, 为 0.36; 秋季为 0.30; 夏季为 0.21。春季光学厚度主要与沙尘爆发和燃煤排放有关; 冬季偏大与燃煤排放有密切关系; 秋季主要是由于 11 月份该地区已进入集中采暖期, 燃煤排放的影响导致秋季光学厚度增大; 夏季降水集中, 空气相对比较干净, 气溶胶光学厚度降低。较长时间序列激光雷达资料有效地反演了兰州地区气溶胶光学厚度的整体分布状况, 有助于理解该地区气溶胶光学特性的整体水平。SACOL 榆中综合观测站位于兰州市远郊榆中县萃英山顶, 距离兰州市中心 48 km; SACOL

城市观测站位于兰州市兰州大学校本部,对比SACOL城郊气溶胶光学厚度,可知榆中综合观测站光学厚度较兰州城市观测站偏小,但2007年3月除外,造成这一现象的主要原因是榆中综合观测站位于兰州市远郊,周边居民分布较兰州市区稀疏,大型工业生产和交通排放源极少。此外,榆中综合观测站位于萃英山顶,地势平坦开阔,扩散条件比城区好,因此,榆中综合观测站气溶胶浓度相对兰州城市观测站偏低。2007年3月受到强沙尘天气的影响,城乡之间沙尘强度和下垫面差异是导致榆中综合观测站气溶胶光学厚度较大的重要因素。

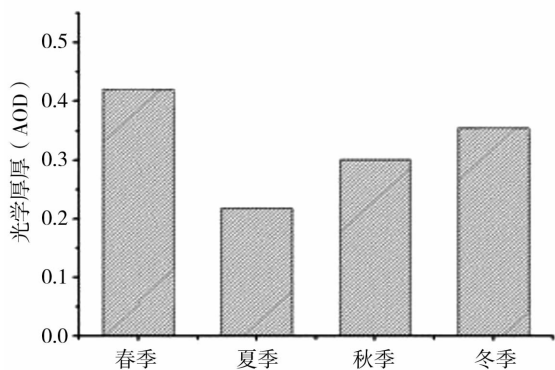


图3 SACOL气溶胶光学厚度季节平均

Fig. 3 The seasonal average of AOD at SACOL

4.2 光学厚度频数分布特征

整体而言,气溶胶光学厚度分布于0.0~0.3最多,占总数的49.9%;0.3~0.6的光学厚度占41.3%;>0.6占6.3%;>0.9占1.7%,分布于采暖期污染严重的日数和春季沙尘天气过程;>1.2的占0.6%,极端值分布于春季较强沙尘过程(图4)。图5为春、夏、秋、冬各个季节气溶胶光学厚度频数百分比。春季气溶胶光学厚度分布于0.3~0.6的最多,占44%,其次是0.0~0.3,占35.7%,>1.2的光学厚度有少量分布;夏季光学厚度以0.0~0.3最多,占86.9%,>0.6的光学厚度几乎没有;秋季光

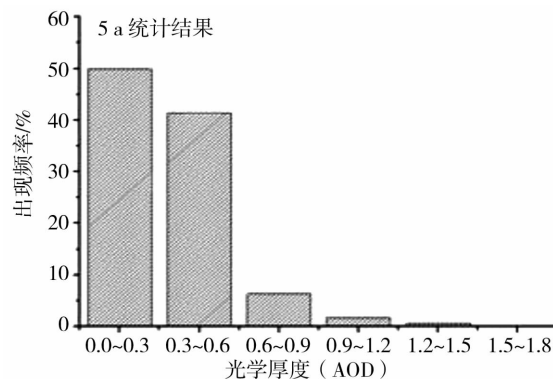


图4 连续5 a SACOL气溶胶光学厚度频数分布

Fig. 4 The occurring frequency of AOD at SACOL from 2006 to 2011

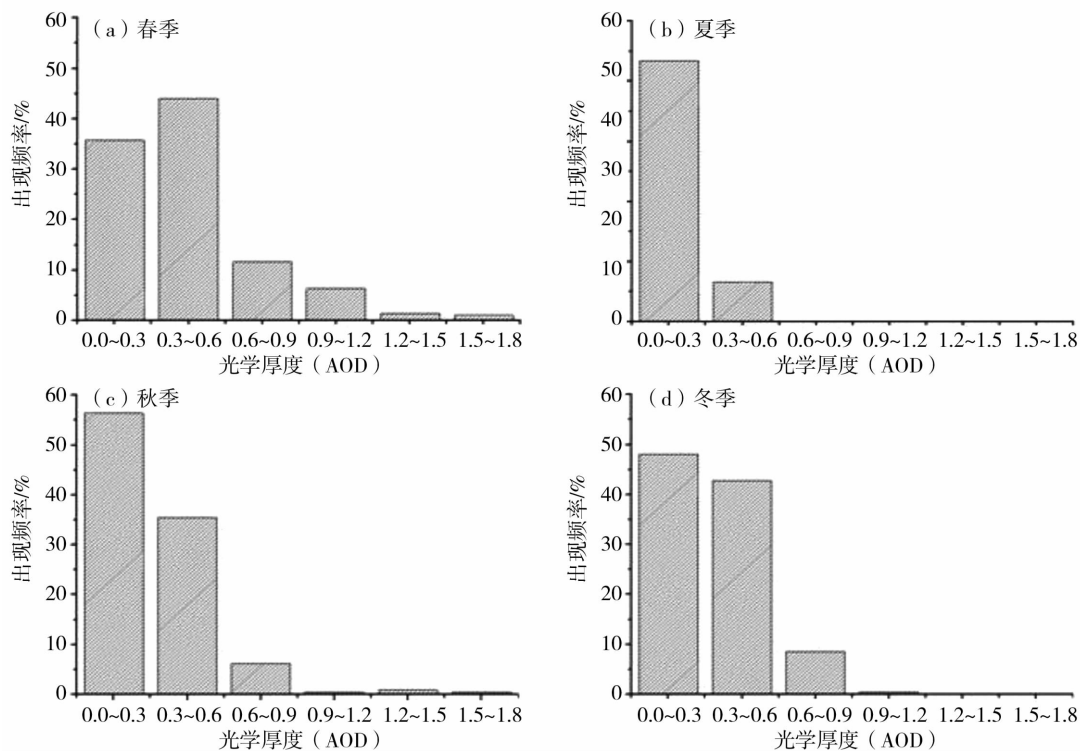


图5 春、夏、秋、冬季SACOL气溶胶光学厚度频数分布

Fig. 5 The frequency of AOD at SACOL in spring, summer, autumn and winter

学厚度频数分布与夏季相似,但由于11月已进入采暖期,秋季气溶胶光学厚度有少量分布于0.6~0.9之间;冬季光学厚度分布于0.0~0.3的和0.3~0.6的频数相当,频数百分比分别为48.1%和42.8%,>0.6的光学厚度频数百分比为9.1%,但几乎没有>1.2的极端值,冬季受燃煤排放的影响导致气溶胶光学厚度偏高,这与春季强沙尘的影响有差异,因此,虽然冬季气溶胶光学厚度值比较大,但几乎没有出现极端值。图5结合图3说明兰州地区空气夏季干净,春季浑浊,冬季次浑浊。

5 结 论

(1)激光雷达反演得到的气溶胶光学厚度与太阳光度计插值得到的光学厚度具有较好的相关性,相关系数为0.86,方差为0.10,拟合直线斜率为1.01。验证结果表明,本文反演所获得的气溶胶光学厚度的精度较高,结果合理可靠。

(2)兰州地区每年3~5月和11~12月气溶胶光学厚度较大,主要原因是3~5月是当地沙尘频发期,11~12月是该区居民集中采暖期,沙尘排放和燃煤排放显著增加了大气气溶胶光学厚度;每年6~10月气溶胶光学厚度偏低,湿沉降清除是主要的影响因素。气溶胶光学厚度季节分布为:春季0.42,冬季0.36,秋季0.30,夏季0.21。

(3)整体而言,气溶胶光学厚度频数分布于0.0~0.3的最多,气溶胶频数分布存在季节差异。春季光学厚度频数以0.3~0.6的为最多,>1.2的极端值有少量分布;夏季与秋季光学厚度频数均以0.0~0.3为最多;冬季气溶胶光学厚度分布于0.0~0.3和0.3~0.6的频数相当。

致谢:兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)提供了激光雷达和光度计观测数据,在此谨致谢忱。

参考文献:

- [1] McCormick R A, Luwidi J H. Climate modification by atmospheric aerosols[J]. *Science*, 1967, 156(3780): 1358-1359.
- [2] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols[J]. *Science*, 1992, 255(5043): 423-430.
- [3] Brock C A, Cozic J, Bahreini R, et al. Characteristics, sources, and transport of aerosols measured in spring 2008 during the aerosol, radiation, and cloud processes affecting Arctic climate (ARCPAC) Project[J]. *Atmospheric Chemistry Physics*, 2011, 11: 2423-2453.
- [4] 吕梦瑶,刘红年,张宁,等.南京市灰霾影响因子的数值模拟[J]. *高原气象*, 2011, 30(4): 929-941.
- [5] 吴兑,张敏汉,梁延刚,等.粤港细粒子(PM_{2.5})污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(11): 2660-2669.
- [6] 郑庆峰,史军.上海霾天气发生的影响因素分析[J]. *干旱气象*, 2012, 30(3): 36-372.
- [7] Holben B N, Smirnov D T A, Eck T F, et al. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D11): 12067-12097.
- [8] 宋薇,张镭.大气气溶胶光学厚度遥感研究概况[J]. *干旱气象*, 2007, 25(3): 78-81.
- [9] 张婕,张海文,肖国杰,等.采暖期前后兰州市城市气溶胶光学特性变化特征[J]. *干旱气象*, 2012, 30(2): 178-181.
- [10] 夏俊荣,张镭. Mie 散射激光雷达探测大气气溶胶的进展[J]. *干旱气象*, 2006, 24(4): 68-81.
- [11] Hair J W, Hostetler C A, Cook A L, et al. Airborne high Spectral resolution lidar for profiling aerosol optical properties[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(36): 6734-6752.
- [12] 张金业,龚威,黄楚云,等. Raman 激光雷达探测气溶胶光学特性[J]. *光子学报*, 2010, 39(7): 1340-1344.
- [13] Amiridis V, Balis D S, Kazadzis S, et al. Four-year aerosol observations with a Raman lidar at Thessaloniki, Greece, in the framework of European Aerosol Research Lidar Network (EARLINET)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D21): D21203, DOI: 10.1029/2005JD006190.
- [14] Ansmann A, Tesche M, Groß S, et al. The 16 April 2010 major volcanic ash plume over central Europe: EARLINET lidar and AERONET photometer observations at Leipzig and Munich, Germany[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(13): L13810, DOI: 10.1029/2010GL043809.
- [15] Ganguly D, Ramaswamy G V, Dubovik O, et al. Inferring the composition and concentration of aerosols by combining AERONET and MPLNET data: Comparison with other measurements and utilization to evaluate GCM output[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D16): D16203, DOI: 10.1029/2009JD011895.
- [16] Misra A, Tripathi S N, Kaul D S, et al. Study of MPLNET-Derived Aerosol Climatology over Kanpur, India, and validation of CALIPSO level 2 version 3 backscatter and extinction products[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(9): 1285-1294.
- [17] 华灯鑫,宋小全.先进激光雷达探测技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(增刊): 21-27.
- [18] 林常青,杨东伟,李成才,等.北京地区大气气溶胶的激光雷达观测及反演算法研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(3): 426-434.
- [19] 潘鹄.利用微脉冲激光雷达研究上海灰霾气溶胶光学特性[D].上海:东南大学,2010.
- [20] 刘文彬,伦伟明,邝俊侠,等.广州城区冬季大气边界层气溶胶激光雷达探测[J]. *广州环境科学*, 2011, 26(2): 7-10.
- [21] 王珍珠,谢晨波,刘博,等.合肥地区背景大气气溶胶的偏振激光雷达测量研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2010, 5(2): 101-106.
- [22] 宋跃辉,华灯鑫,李仕春.微脉冲偏振激光雷达探测城市底层气溶胶[J]. *光子学报*, 2012, 41(10): 1140-1144.

- [23] Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, et al. An Overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau[J]. *Advanced in Atmospheric Sciences*, 2008, 25(6): 906–921.
- [24] Zhang L, Cao X, Bao J, et al. A case study of dust aerosol radiative properties over Lanzhou, China[J]. *Atmospheric Chemistry Physics*, 2010(10): 4283–4293.
- [25] 胡蝶, 张镭, 王宏斌. 黄土高原干旱半干旱地区气溶胶光学厚度遥感分析[J]. *高原气象*, 2013, 32(3): 654–664.
- [26] 周碧, 张镭, 曹贤洁, 等. 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*, 2011, 30(4): 1011–1017.
- [27] 张北斗, 靳秦建, 黄建平. 半干旱气候与环境综合观测站(SACOL)仪器通讯集成研究[J]. *干旱气象*, 2009, 27(1): 78–81.
- [28] 赵柏林, 张蒿琛. 大气探测原理[M]. 北京: 气象出版社, 1987. 392–393.
- [29] 尹宏. 大气辐射基础[M]. 北京: 气象出版社, 1993. 144.
- [30] 郭江勇, 李耀辉. 中国西北地区夏季降水的气候特征[J]. *干旱区研究*, 2006, 23(3): 481–494.
- [31] 陈学君, 胡文超, 杨瑜锋, 等. 甘肃降水量正态性分析[J]. *干旱气象*, 2013, 31(1): 107–112.
- [32] 王振海, 张武, 史晋森, 等. 半干旱地区大气颗粒物浓度及粒径谱特征的观测研究[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(5): 1186–1193.
- [33] 周碧. 黄土高原半干旱区气溶胶辐射特性观测研究[D]. 兰州: 兰州大学大气科学学院, 2012. 87.

Analysis of Aerosol Optical Depth over Lanzhou Based on Lidar Measurement

ZHOU Bi^{1,2}, ZHANG Lei¹, JIANG Deming², CAO Xianjie¹, SUI Bing²

(1. Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China; 2. Hu'nan Institute of Meteorological Sciences, Changsha 410007, China)

Abstract: Based on the lidar (CE-370-2) observations under clear sky condition from 2006 to 2011 in the Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL), and combined the multi-channel sun photometer (CE-318) data from December 2006 to May 2007, the AOD retrieved from the Lidar was compared with the interpolation AOD of the sun photometer, in addition, the characteristics of AOD over Lanzhou were analyzed. The results suggest that AODs retrieved from the lidar system and observed by the sun photometer (CE-318) had good correlation with the correlation coefficient of 0.86, the retrieval method of lidar data was believable. The values of aerosol optical depth were quite high from March to May, which was mainly caused by dust occurring frequently, and AODs' values were also very high from November to December, which was primarily caused by man-made coal burning for protection against cold. While AODs' values were extremely low from June to October, which was prevailingly caused by the wet deposition clearing. The seasonal distribution of aerosol optical depth showed that AOD was 0.42 in spring, 0.36 in winter, 0.30 in autumn and lowest in summer with the value of 0.21. The frequency of aerosol optical depth is about 50% below 0.3 with the significant seasonal differences. The results illustrate that the sky over Lanzhou region is clean in summer while it is turbid in spring and next in winter.

Key words: lidar; Lanzhou region; aerosol optical depth (AOD); frequency