

中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析

张朝阳^{1,2} 苏 林¹ 陈良富¹

(¹ 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; ² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 为了解决大部分微脉冲激光雷达无法独立获取激光雷达比的问题, 利用榆林、北京、寿县和太湖 4 个地区气溶胶监测网(AERONET)站点观测的气溶胶粒子谱分布和复折射指数产品, 通过米氏散射方法计算得到气溶胶激光雷达比。根据得到的长时间序列气溶胶激光雷达比分析了不同地区激光雷达比的季节变化和年变化特征, 并结合 Angstrom 波长指数对不同地区气溶胶类型进行了简单分析。得到了以下结论: 不同地区同季节以及同地区不同季节激光雷达比相差较大; 观测期间榆林地区年平均激光雷达比最小, 多年平均值为 (36.3 ± 15) sr; 北京、太湖和寿县地区的雷达比年均值较大; 北京地区激光雷达比年均值的最低值出现在 2008 年, 其他地区的年均值变化不大; 激光雷达比与 Angstrom 波长指数能够区分各地区气溶胶主要类型且均出现由北到南递增的趋势。

关键词 大气光学; 激光雷达比; 米氏散射; Angstrom 波长指数

中图分类号 TN012 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0513002

Retrieval and Analysis of Aerosol Lidar Ratio at Several Typical Regions in China

Zhang Zhaoyang^{1,2} Su Lin¹ Chen Liangfu¹

(¹ Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to solve the problem that most of micro-pulse lidars cannot obtain lidar ratio (LR) independently, LR from aerosol size distribution and complex refractive index is acquired with Mie scattering theory. Four aerosol robotic network (AERONET) stations that include SACOL station, Beijing station, Shouxian station and Taihu station are used. The LR variation characteristics of seasonal-mean and years' average values in different regions and aerosol types are analyzed by using LR and Angstrom wavelength index. The conclusions are as follows: LRs in chinese different regions and seasons show complex and different variation characteristics; the LR in Yulin is the least and years' average value is (36.3 ± 15) sr; LRs are relatively larger in Taihu, Beijing and Shouxian; annual average value of 2008 is smaller than other years in Beijing and there is little variation of years' average value in other regions. LR and Angstrom wavelength index can distinguish aerosol type and they both increase from north to south in the analysis regions.

Key words atmospheric optics; lidar ratio; Mie scattering; Angstrom wavelength index

OCIS codes 010.1290; 290.4020; 280.3640; 010.1110

1 引 言

气溶胶垂直分布特征对局地的气候和天气条件有十分重要的影响, 同时气溶胶垂直分布的变化为很多科学问题的定量化研究带来困难, 包括气候、云物理、卫星气象、地球化学循环以及空气质量问题; 对大气辐射强迫、地面辐射预算以及大气层顶的

研究都会涉及到气溶胶的垂直分布信息^[1,2]。因此, 对大气气溶胶消光系数垂直分布的高精度探测, 对于全球气候变化的研究有着重要意义。

微脉冲激光雷达是探测气溶胶垂直分布的主要手段, 目前已建成全球微脉冲激光雷达探测网(MPLNET)。但在激光雷达探测气溶胶垂直分布

收稿日期: 2012-12-11; **收到修改稿日期:** 2013-01-21

基金项目: 国家 973 计划(2010CB950801)资助课题。

作者简介: 张朝阳(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事微脉冲激光雷达和太阳光度计联合反演等方面的研究。

E-mail: zhangchaoyang10@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 苏 林(1959—), 男, 博士, 研究员, 主要从事大气激光雷达方面的研究。E-mail: sulin@irsa.ac.cn(通信联系人)

反演方法方面,尤其是白天高精度反演方法方面的研究还不够成熟。主要表现在一个激光雷达探测方程中存在两个未知量,即消光系数和后向散射系数,定量反演这两个量必须有其他信息作为辅助^[3~6]。若没有辅助信息而使用激光雷达观测数据精确地反演气溶胶消光系数垂直分布,气溶胶的消光系数和后向散射系数的比值,消光后向散射比[也称为激光雷达比(LR)]是一个必需的参数^[7]。一般假设该参数为常数,将消光系数和后向散射系数这两个未知参数转化为一个未知量,从而达到求解的目的。

由于 LR 是时间和空间的复杂函数,它不仅与气溶胶粒子的尺度谱有关,还跟气溶胶的组成有紧密关系^[8,9],因此,可以通过反演不同区域气溶胶的 LR 来分析气溶胶的类型。有研究指出在气溶胶消光系数的反演过程中,LR 的误差对结果的精确性有很大的影响,在气溶胶的分布不均匀的情况下,这种影响更大^[10]。在不同的地理位置和气象条件下反演消光系数时,必须准确地给出对应的 LR。另一方面,由于 LR 与气溶胶的分布类型有着密切的关系,可以通过获得不同区域气溶胶的 LR 并配合气溶胶的 Angstrom 波长指数来分析气溶胶的类型。

目前得到 LR 的方法主要有两大类:独立测量法和联合反演法。独立测量分为多角度测量法^[11]、高光谱分辨率雷达法和拉曼雷达法^[12],目前广泛使用拉曼雷达法。联合反演包括用卫星测得的光学厚度限制激光雷达测得的气溶胶消光系数的垂直积分法^[13]和利用太阳光度计与激光雷达反演 LR^[3]。考虑白天情况下拉曼雷达探测精度的限制,本文采取利用太阳光度计反演的方法对中国部分典型地区的 LR 进行反演与分析。

2 反演方法、数据及误差分析

2.1 太阳光度计反演激光雷达比方法

激光雷达向大气中发射的激光脉冲由于大气分子和气溶胶粒子的作用向空间各个方向散射,其后向散射部分被激光雷达接收系统接收用于分析气溶胶粒子的物理和光学性质。设 β 是气溶胶后向散射系数、 σ_e 是气溶胶消光系数,则消光系数和后向散射系数的比值就是 LR(单位:sr),用 S 表示,即

$$S = \sigma_e / \beta. \quad (1)$$

单个气溶胶粒子对光的散射与消光作用由其尺度参数 x 和复折射指数 m 决定,其中 $x = 2\pi r / \lambda$, r 为粒子半径, λ 为光的波长。粒子系统整体光学特性由

单个粒子光学特性按粒子谱分布集合决定:

$$\sigma_e = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_e(m, r) \frac{dN(r)}{d\ln r} \pi r^2 dr, \quad (2)$$

$$\beta = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_\pi(m, r) \frac{dN(r)}{d\ln r} \pi r^2 dr, \quad (3)$$

式中积分限 r_{\min} 、 r_{\max} 分别为粒子系统的最小和最大特征半径,分别取 $0.01 \mu\text{m}$ 和 $15 \mu\text{m}$; Q_e 、 Q_π 分别为消光和后向散射效率因子,可利用复折射指数和粒子半径根据米氏散射理论得到; $\frac{dN(r)}{d\ln r}$ 为气溶胶粒子数谱分布, $N(r)$ 为与气溶胶半径有关的气溶胶个数。太阳光度计可以反演得到气溶胶体积谱分布,可以表示为

$$\frac{dV(r)}{d\ln r} = \frac{C_{v,F}}{\sqrt{2\pi}\delta_F} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_{v,F})^2}{2\delta_F^2}\right] + \frac{C_{v,C}}{\sqrt{2\pi}\delta_C} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_{v,C})^2}{2\delta_C^2}\right], \quad (4)$$

式中下标 C, F 分别代表气溶胶监测网(AERONET)反演出的气溶胶粗粒子模态和细粒子模态, δ 为标准偏差, C_v 为体积浓度, r_v 为体积中值半径, $V(r)$ 为与气溶胶半径有关的气溶胶体积。

由气溶胶体积谱分布 $\frac{dV(r)}{d\ln r}$ 来反演气溶胶数谱分布,两者之间的关系可以表示为

$$\frac{dV(r)}{d\ln r} = v_1(r) \frac{dN(r)}{d\ln r} = \frac{4}{3} \pi r^3 \frac{dN(r)}{d\ln r}. \quad (5)$$

由(1)~(5)式可以算出 LR。选择计算 550 nm 波段的 LR,主要原因是国际气象组织选择 550 nm 波段作为研究气溶胶标准,且气溶胶的 Angstrom 波长指数在 550 nm 与 532 nm 相差很少,LR 的误差可以忽略^[14]。Angstrom 给出了气溶胶光学厚度(AOD)与波长之间的关系式^[15]:

$$\tau(\lambda) = k\lambda^{-\alpha}, \quad (6)$$

式中 $\tau(\lambda)$ 为对应波段的 AOD, k 为 Angstrom 混浊系数,可以代表大气中气溶胶的浓度; α 为 Angstrom 波长指数。(6)式代入不同波长且相除后取对数,即可计算出 Angstrom 波长指数 α :

$$\alpha = \frac{-\ln(\tau_{\lambda_1} / \tau_{\lambda_2})}{\ln(\lambda_1 / \lambda_2)}. \quad (7)$$

对于计算 Angstrom 波长指数,选取的波段很重要,雷达常见波段 532 nm 和 1064 nm 反映出的信息量比较少^[14]。本文采用 440 nm 和 870 nm 波段来得到 Angstrom 波长指数。光学厚度是消光系数的积分,可得

$$\alpha = \frac{-\ln[\sigma_{\lambda_1}(z)/\sigma_{\lambda_2}(z)]}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)} \quad (8)$$

2.2 气溶胶监测网站点与资料介绍

AERONET 是全球布站的气溶胶特性地基观测网,它以法国 CIMEL 公司生产的全自动 CE318 太阳光度计为观测仪器,该仪器扫描获得的太阳直射辐射数据可以用于反演气溶胶光学厚度、大气可降水量等。当其进行天空扫描时,所获得的数据可用于反演气溶胶粒子谱分布、复折射指数及气溶胶散射相函数^[16]。

利用的 AERONET 站点数据是榆林(35.94°, 104.13°)、北京(39.97°, 116.38°)、寿县(116.78°, 32.56°)、太湖(31.42°, 120.21°)共 4 个站点的 Level 2.0 数据,分别利用了 AERONET 站点中的复折射指数、体积谱分布。榆林站点位于中国西部;北京位于中国东北部;寿县位于中国中部;太湖位于中国南部,分别代表我国部分典型地区,见图 1。各站点有效数据的数量如表 1 所示。



图 1 利用到的站点分布图

Fig.1 Map of AERONET stations

表 1 各地区有效数据数列表

Table 1 Valid data list in different stations

Station	SACOL	Beijing	Shouxian	Taihu
Day	364	1021	64	482

2.3 大气气溶胶激光雷达红外探索卫星观测系统资料介绍

大气气溶胶激光雷达红外探索卫星观测系统(CALIPSO)的主要任务是研究大气中的悬浮粒子-气溶胶粒子和云的空间垂直分布及其光学特性。其中,正交偏振云-气溶胶激光雷达是一台对偏振敏感的双波长激光雷达,532 nm 和 1064 nm 两种波长之间的后向散射信号差别可区分气溶胶颗粒的尺寸,而 532 nm 波长的正交偏振检测可区分云的冰相和水相。CALIPSO 作为世界上首个应用型的星载云和气溶胶激光雷达,其观测能力优异,可实现全球范围内的大气探测。因此,可利用 CALIPSO 探测数据分析全球范围的大气气溶胶、沙尘、烟尘以及卷云等分布变化。

CALIPSO 得到的最终的 LR 可能是由以下 3 种方式中的一种产生:1)由分类算法提供的初始 LR。2)由透射率法确定的 LR。当大气中出现适合的气溶胶层,且气溶胶层的上、下均为清洁大气时,S 可直接由 CALIPSO 的探测数据确定。3)查找表法获取的 LR^[17]。在绝大多数情况下,S 的确定可以通过查找表法进行,根据激光雷达的观测值和地表类型,就可以确定气溶胶类型,一旦气溶胶类型被识别,S 的值也就确定了。S 的选择算法可以将误差控制在 30% 以内。

利用 CALIPSO 的 Lidar Level 2.0 水平分辨率为 5 km 的气溶胶产品,选取 4 个站点水平 100 km 范围内的所有有效值进行平均得到该地区及其周边的不同高度的气溶胶 LR,用于分析不同高度引起的太阳光度计反演得到的柱 LR 的误差。

2.4 误差分析

本文主要涉及到两种误差:AERONET 站点观测到的气溶胶粒子谱分布和复折射指数的误差所带来的 LR 误差;激光雷达在白天探测的高度 h 为 5~8 km,因此主要是利用中低层气溶胶的 LR,但 AERONET 站点产品计算得到的是整层气溶胶的 LR,这会引起一部分误差。针对以上两种误差,分别进行分析。

对 AERONET 产品引起的误差,利用统计分析得到的标准差来表示。主要有两个原因:LR 的误差很难通过一次测量得到;LR 计算过程中涉及到米氏散射等非线性过程,这使得 LR 误差不可能通过计算误差传递的方式来得到^[3]。

为了分析整层气溶胶的 LR 在激光雷达反演中低层气溶胶过程中所带来的误差,引入 CALIPSO 所得到的 LR。统计分析站点附近不同高度的 CALIPSO LR 数据,统计结果见表 2 和图 2。表 2

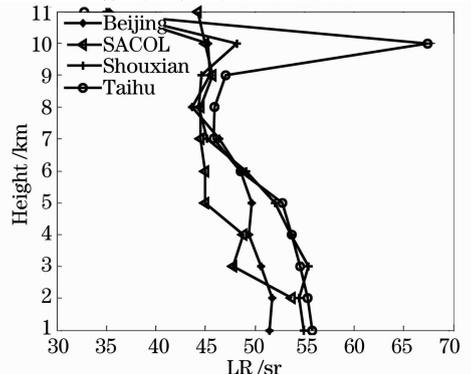


图 2 各地区气溶胶激光雷达比不同高度分布图

Fig.2 Profile of LR in different regions

中的统计结果显示大部分的气溶胶都集中在 6 km 以下;由图 2 可以看出若气溶胶的高度在 9 km 以下,则采用柱 LR 对不同高度消光系数反演所带来的平均误差小于 12%。当气溶胶高度大于 9 km 时,柱 LR 对于中下层气溶胶消光系数反演所带来的误差会相应增大,但由于高于 9 km 的这部分气溶胶较少,从而其引起的误差增加很小。然而特殊条件下,气溶胶的分层会使其误差增大。总体来看,采用柱 LR 对于气溶胶垂直消光系数的反演带来的年平均误差小于 12%。

表 2 各站点气溶胶在不同高度范围内出现的次数

Table 2 Number of occurrences of aerosol at different heights

<i>h</i> /km	Beijing	SCOAL	Taihu	Shouxian
$(-\infty, 1]$	252	0	225	261
$[1, 2]$	379	3	267	336
$[2, 3]$	361	239	208	282
$[3, 4]$	265	276	153	191
$[4, 5]$	190	238	122	143
$[5, 6]$	122	185	83	102
$[6, 7]$	79	139	50	77
$[7, 8]$	49	123	43	72
$[8, 9]$	42	79	25	51
$[9, 10]$	44	60	25	37
$[10, +\infty)$	62	58	42	68

3 典型地区的激光雷达比特征分析

3.1 各地区激光雷达比季变化特征分析

图 3 为各地区气溶胶 LR 季均值分布情况。根

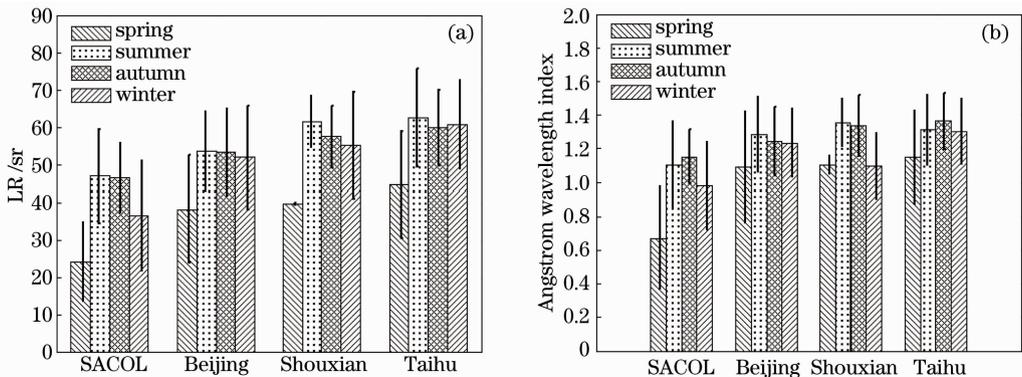


图 3 各地区(a)气溶胶激光雷达比和(b)Angstrom 波长指数季节分布特征

Fig. 3 Seasonal-mean (a) LR and (b) Angstrom wavelength index variation characteristics in different regions

3.2 各地区激光雷达比年均值分析

图 4 是具有多年数据的榆林、北京和太湖地区 LR 的年均值分布。榆林和太湖地区 LR 的年均值变化不大。北京地区除 2008 年 LR 较低外,其他年份 LR 年均值也变化不大。2008 年北京地区 LR 较低的主要原因是奥运会召开,北京及周边地区的清

据各地区季均值看出,相同季节不同地区以及不同季节相同地区的 LR 差异较大。但是北京、寿县和太湖在夏、秋和冬季的 LR 也相差不大,这说明站点在这 3 个季节内的总体气溶胶类型都处于基本稳定状态,与其他研究结果相同^[18]。春季与其他季节相比 LR 和 Angstrom 波长指数都较小,这很大程度上是因为春季中国受频繁活动的沙尘天气影响,使得大气中积聚很多大粒子。从图 3 看出,从北到南,榆林、北京、寿县、太湖 LR 和 Angstrom 波长指数呈现增长的趋势,而且两者的趋势基本相同。榆林地区气溶胶 LR 相对波动较大,这是因为榆林地区四季气溶胶变化较大^[19]。各地区数年 LR 和 Angstrom 波长指数季均值中春季最小;除榆林地区外,其他地区冬季、夏季和秋季较大且三者之间相差不大。整体来看,4 个地区气溶胶 LR 的峰值分布由高到低依次为寿县、太湖、北京、榆林,总平均值分别为 (56.8 ± 11) sr、 (54.7 ± 14) sr、 (48.6 ± 14) sr、 (36.3 ± 15) sr;寿县春、夏、秋、冬的均值为 (39.6 ± 1) sr、 (61.4 ± 7) sr、 (57.4 ± 8) sr、 (55.1 ± 14) sr;太湖春、夏、秋、冬的均值为 (44.5 ± 14) sr、 (62.5 ± 13) sr、 (59.8 ± 10) sr、 (60.7 ± 11) sr;北京春、夏、秋、冬的均值为 (38.1 ± 14) sr、 (53.4 ± 10) sr、 (53.2 ± 11) sr、 (51.9 ± 13) sr;榆林春、夏、秋、冬的均值为 (24.1 ± 10) sr、 (46.9 ± 12) sr、 (46.4 ± 9) sr、 (36.3 ± 14) sr。

洁能源的使用、机动车污染的控制和工业污染源的治理使得黑炭类气溶胶(黑炭气溶胶的 LR 较高)的排放较少^[20]。但是在 2009 年 LR 重新升高,但依旧比 2008 年之前要低。北京 2008 年气溶胶 LR 较低说明了北京地区奥运期间的减排措施有较好的效果,改善了空气质量状况,对环境保护具有一定的积极作用。

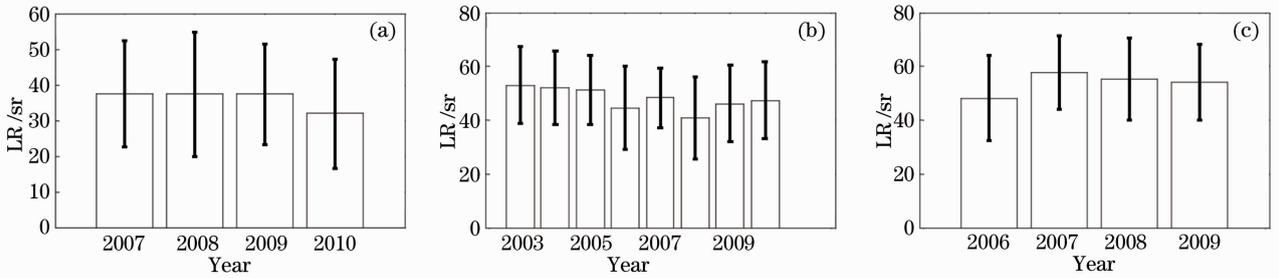


图4 各地区各年气溶胶激光雷达比。(a) SACOL; (b) Beijing; (c) Taihu

Fig. 4 Annual average LR/sr in different regions. (a) SACOL; (b) Beijing; (c) Taihu

4 各地区气溶胶类型分析

LR 和 Angstrom 波长指数在一定程度上反映了气溶胶类型,利用两者可以分析出各地主要气溶胶类型。根据气溶胶 LR 和 Angstrom 波长指数把气溶胶分为 5 类:生物质燃烧型气溶胶、海洋型气溶胶、沙尘型气溶胶、城市气溶胶和“亚洲型气溶胶”^[14]。表 3 是 5 种类型气溶胶的复折射指数和 Angstrom 指数经验值范围,括号内为高斯拟合标准差。图 5 为各地区气溶胶 LR 与 Angstrom 波长指数分布情况。4 个站点均有大部分数据集中在亚洲型气溶胶附近,这与北京站点在 1, 2 月和 6~12 月的气溶胶类型(主要为亚洲型气溶胶)一致。各地区均有一部分数据分布在海洋型气溶胶附近,这些站点距离海岸 100 km 以外,海洋型气溶胶对站点气溶胶粗、细粒子的贡献分别为 10%~20%和

2%~3%^[21],因此这部分 LR 和 Angstrom 波长指数主要是由其他几种气溶胶混合产生的。从图上看到有一部分数据不在这 5 种气溶胶类型经验值范围内,这部分数据是几种气溶胶混合产生的现象。

表 3 各类型气溶胶激光雷达比与 Angstrom 波长指数经验值

Table 3 Empirical LR/sr and Angstrom wavelength indices of different aerosol types

Aerosol type	LR /sr	Angstrom wavelength index
Biomass burning	60(8)	1.8(0.2)
Maritime	28(5)	0.7(0.4)
Dust	15(5)	0.2(0.2)
Urban/industrial	71(10)	1.7(0.2)
Southeast Asia	58(10)	1.3(0.2)

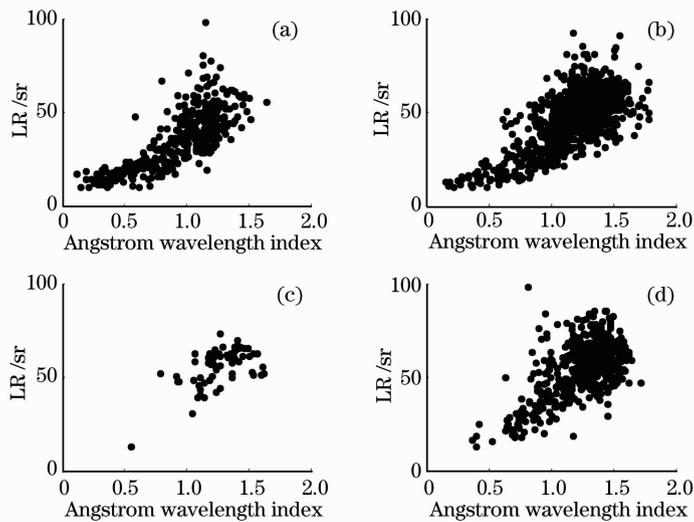


图5 各地区气溶胶激光雷达比与 Angstrom 波长指数分布图。(a) SACOL; (b) Beijing; (c) Shouxian; (d) Taihu

Fig. 5 Maps of seasonal-mean LR/sr and Angstrom wavelength indices in different regions.

(a) SACOL; (b) Beijing; (c) Shouxian; (d) Taihu

5 结 论

利用寿县、太湖、北京、榆林 4 个 AERONET 站点数据计算了气溶胶 LR 并对其进行分析,得到 LR 年季变化特征。相同季节不同地区以及相同地区不同季节的 LR 差异较大。所以在激光雷达观测气溶胶的实际应用中,仅仅选取一个固定的 LR 是不够的,应该尽可能地利用其他技术手段分析大气气溶胶的种类和物理光学特性,从而得到更准确的 LR。通过太阳光度计反演得到中国典型地区气溶胶 LR 并给出了各地区不同季节可用数值,为该地区所代表区域微脉冲激光雷达的消光系数反演提供了有力的支持。利用 CALIPSO 提供的不同高度的 LR,对激光雷达采取 LR 所产生的误差做了相关分析。寿县、太湖、北京地区气溶胶 LR 和 Angstrom 指数在夏秋季节变化不大,其中 LR 均在 55 sr 上下;春季 LR 受到沙尘气溶胶的影响,与其他 3 个季节相比较低。榆林地区四季气溶胶变化较大,LR 也变化较大。榆林和太湖地区 LR 年均值变化不大,但北京地区在 2008 年实施了减排措施,因此 2008 年 LR 年均值与其他年份相比较小。从地域上来看,气溶胶 LR 呈现从北到南递增的趋势,这一趋势与 Angstrom 指数趋势一致。

参 考 文 献

- 1 G. L. Schuster, M. Vaughan, D. Macdonnell *et al.*. Comparison of CALIPSO aerosol optical depth retrievals to AERONET measurements, and a climatology for the lidar ratio of dust [J]. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2012, **12**(5): 11641~11697
- 2 A. K. Srivastava, S. N. Tripathi, S. Dey *et al.*. Inferring aerosol types over the Indo-Gangetic Basin from ground based sunphotometer measurements[J]. *Atmospheric Research*, 2012, **109-110**: 64~75
- 3 A. Pietruczuk, J. Podgórski. The lidar ratio derived from sunphotometer measurements at Belsk Geophysical Observatory[J]. *Acta Geophysica*, 2009, **57**(2): 476~493
- 4 J. Raut, P. Chazette. Retrieval of aerosol complex refractive index from a synergy between lidar, sunphotometer and *in situ* measurements during LISAIR experiment [J]. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2007, **7**(1): 2797~2815
- 5 F. Mao, W. Gong, Z. Zhu *et al.*. The ground-based lidar combined with sunphotometer for aerosol optical depth retrieval [C]. *SPIE*, 2008, **7145**: 71452R
- 6 Y. Sasano, E. V. Browell, S. Ismail. Error caused by using a constant extinction/backscattering ratio in the lidar solution[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(22): 3929~3932
- 7 F. G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observations[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653

- 8 V. A. Kovalev, M. P. Bristow. Compensational three-wavelength differential-absorption lidar technique for reducing the influence of differential scattering on ozone-concentration measurements[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(24): 4790~4797
- 9 Wang Xiangchuan, Rao Ruizhong. Lidar ratios for atmospheric aerosol and cloud particles[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1321~1325
王向川, 饶瑞中. 大气气溶胶和云雾粒子的激光雷达比[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1321~1325
- 10 S. J. Doherty, T. L. Anderson, R. J. Charlson. Measurement of the lidar ratio for atmospheric aerosols with a 180° backscatter nephelometer[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(9): 1823~1832
- 11 J. D. Spinhirne, J. A. Reagan, B. M. Herman. Vertical distribution of aerosol extinction cross section and inference of aerosol imaginary index in the troposphere by lidar technique[J]. *J. Appl. Met.*, 1980, **19**(4): 426~438
- 12 S. Otto, E. Bierwirth, B. Weinzierl *et al.*. Solar radiative effects of a Saharan dust plume observed during SAMUM assuming spheroidal model particles[J]. *Tellus B*, 2009, **61**(1): 270~296
- 13 F. Dulac, P. Chazette. Airborne study of a multi-layer aerosol structure in the eastern Mediterranean observed with the airborne polarized lidar ALEX during a STAAARTE campaign (7 June 1997)[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2003, **3**(5): 1817~1831
- 14 C. Cattrall, J. Reagan, K. Thome *et al.*. Variability of aerosol and spectral lidar and backscatter and extinction ratios of key aerosol types derived from selected Aerosol Robotic Network locations [J]. *J. Geophysical Research*, 2005, **110**(D10): D10S11
- 15 Anders Angström. The parameters of atmospheric turbidity[J]. *Tellus*, 1964, **16**(1): 64~75
- 16 B. N. Holben, T. I. E. I. Slutsker, D. Tar *et al.*. AERONET: a federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. 1998, **66**(1): 1~16
- 17 Z. Liu, A. Omar, Y. Hu *et al.*. CALIOP Algorithm Theoretical Basis Document, Part 3: Scene Classification Algorithms [R]. NASA Langley Research Center Doc. PC-SCF-202, 2005. 1~56
- 18 Wu Mingquan, Niu Zheng, Qiao Yuliang *et al.*. Aerosol types and its affecting factors over Beijing: based on MODIS data[J]. *J. Geo-Information Science*, 2009, **11**(4): 541~548
邬明权, 牛 铮, 乔玉良等. 基于 MODIS 数据的北京气溶胶类型特性与影响因素分析[J]. *地球信息科学学报*, 2009, **11**(4): 541~548
- 19 Cao Xianjie, Zhang Lei, Li Xia *et al.*. Analyses on aerosol absorption and scattering properties in Zhangye region [J]. *Plateau Meteorology*, 2010, **29**(5): 1246~1253
曹贤洁, 张 镭, 李 霞等. 张掖地区气溶胶吸收和散射特性分析[J]. *高原气象*, 2010, **29**(5): 1246~1253
- 20 Wu Dexia, Liu Jianguo, Lu Yihuai *et al.*. Observation of black carbon aerosol during Beijing Olympic Games[J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2009, **4**(4): 300~306
伍德侠, 刘建国, 陆亦怀等. 北京奥运期间的碳黑气溶胶观测研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2009, **4**(4): 300~306
- 21 Rao Jiawang, Ma Ronghua, Duan Hongtao *et al.*. Aerosol optical thickness of the atmospheric aerosol over Taihu Lake and its features: results of in-site measurements[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **33**(7): 2158~2164
饶加旺, 马荣华, 段洪涛等. 太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2158~2164

栏目编辑: 王晓琰