

基于动态雷达比的气溶胶消光系数及光学厚度反演

包青¹ 贺军亮² 查勇¹

¹南京师范大学地理科学学院虚拟地理环境教育部重点实验室、江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,
江苏 南京 210023

²石家庄学院资源与环境科学学院, 河北 石家庄 050035

摘要 激光雷达以其高垂直空间分辨率和高时间分辨率的优势在大气气溶胶监测中具有重要作用。在利用 Fernald 法反演气溶胶消光系数和光学厚度的过程中, 雷达比是反演结果的主要误差源。在目前的应用中雷达比普遍都是取固定值, 这就必然给雷达反演带来误差。通过对污染物以及气象数据与雷达比的逐步回归分析, 建立了雷达比估算模型, 从而实现雷达比的动态估算。研究表明: 雷达比的变化与空气中 PM_{2.5} 质量浓度、相对湿度、SO₂ 和 NO₂ 质量浓度等具有明显相关性。相比于固定值, 利用动态雷达比反演的气溶胶消光系数和光学厚度精度明显提高。

关键词 大气光学; 动态雷达比; 气溶胶; 消光系数; 气溶胶光学厚度

中图分类号 P412.292

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0301002

Retrieval of Aerosol Extinction Coefficient and Optical Thickness Using Varied Lidar Ratio

Bao Qing¹ He Junliang² Zha Yong¹

¹Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, College of Geographic Science, Nanjing Normal University, Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing, Jiangsu 210023, China

²Resource and Environment Department of Shijiazhuang College, Shijiazhuang, Hebei 050035, China

Abstract Lidar plays an important role in monitoring atmospheric aerosol for its high vertical spatial and temporal resolution. During the process of inverting aerosol extinction coefficient and optical depth by Fernald method, Lidar ratio is the main error source. However, in the present application, Lidar ratio is commonly taken as a fixed value, which may inevitably bring a certain amount of errors to the retrieval from Lidar measurement. An estimating model to calculate varied Lidar ratio through the stepwise regression analysis of pollutant data, meteorological data and Lidar data is established. The study shows that Lidar ratio has significant correlation with PM_{2.5} mass concentration, relative humidity and the mass concentration of SO₂ and NO₂. Compared to the fixed value, the usage of varied Lidar ratio can significantly improve the inversion accuracy of aerosol extinction coefficient and optical depth.

Key words atmospheric optics; varied Lidar ratio; aerosol; extinction coefficient; aerosol optical depth

OCIS codes 010.1110; 010.3640; 280.1100; 280.3640

1 引言

气溶胶在大气辐射收支和全球气候变化中扮演了重要的角色。自然以及人为产生的气溶胶的辐射强迫效应呈现出很强的周期性和区域性变化, 其在局部地区产生的辐射强迫甚至超过温室气体^[1]。获取详细

收稿日期: 2014-08-04; 收到修改稿日期: 2014-11-05

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2014CB953802)、河北省教育厅资助科研项目(Z2014090)、江苏高校优势学科建设工程

作者简介: 包青(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光雷达大气污染监测方面的研究。E-mail: baoqing2004@126.com

导师简介: 查勇(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事大气遥感方面的研究。E-mail: 09082@njnu.edu.cn(通信联系人)

的气溶胶全球分布以及相关属性信息对评估气溶胶对全球辐射收支的影响具有重要意义^[2]。气溶胶消光系数和气溶胶光学厚度(AOD, τ)作为衡量气溶胶光学属性的重要参数,一直是相关领域研究的重点之一。目前,日益成熟的被动遥感技术,如中分辨率成像光谱仪(MODIS)多光谱探测,为大气气溶胶的全球分布研究提供了重要的技术支撑,但其也存在明显缺陷,主要体现在其无法获取气溶胶的垂直分层信息。

激光雷达技术以其高时空分辨率的优势弥补了这一缺点并日益成为研究气溶胶垂直结构以及时空演变的重要工具^[3-5]。目前利用激光雷达反演气溶胶光学属性的方法主要包括 Collis 斜率法^[6]、Klett 法^[7]以及 Fernald 法^[8],其中 Fernald 法应用最为广泛。在 Fernald 法中,气溶胶消光系数与后向散射系数之比即雷达比(LR,单位为 sr)对反演起着重要作用。目前,普遍将 LR 取固定值进行反演。例如在 532 nm 波长,城市气溶胶的 LR 一般取值约为 50 sr,亚洲沙尘雷达气溶胶的 LR 一般为 40~60 sr,海洋型气溶胶 LR 约为 20 sr^[9]。

雷达比是时间和空间的复杂函数,与气溶胶的组成以及粒子的尺度谱等都有紧密联系^[10]。准确地获取雷达比对激光雷达的反演至关重要。Sasano 等^[11]系统地分析了雷达反演过程中固定雷达比所导致的误差;贺千山^[12]通过一系列仪器定标和各种相关订正技术手段以及误差模拟分析,认为 LR 是雷达反演过程中的主要误差来源。目前 LR 的确定方法主要包含独立测量和联合反演两大类。独立测量法主要包含多角度测量法^[13]、高光谱分辨率雷达法和拉曼雷达法^[14],拉曼雷达法应用最为常见。然而,拉曼雷达设备昂贵,且仪器在白天容易受到天空背景信号的影响,探测精度会受到限制。联合反演法主要是通过卫星^[15]或太阳光度计^[16]反演得到的 AOD 来约束激光雷达反演的 AOD,进而迭代得出 LR。此外利用太阳光度计结合米氏散射理论也可以计算 LR^[17]。在利用联合反演法计算 LR 时,前人的研究往往着重于寻找研究区在一个时间段内的最合适的固定雷达比^[18],而忽略了对雷达比在短期(如 24 h)内变化情况的估算,这无疑为雷达反演气溶胶消光系数和光学厚度的结果带来了误差。

本文利用现有的南京仙林地区环境监测数据,将太阳光度计实测的气溶胶光学厚度作为约束条件得到动态的 LR。使用逐步回归法,分析雷达比变化与污染物、气象等因子的关系,从而建立 LR 估算模型,再将估算模型所得到的 LR 用于气溶胶消光系数和光学厚度反演。

2 数据和方法

2.1 数据

激光雷达系统位于中国南京师范大学仙林校区大气环境监测站(E118.913°,N32.103°,海拔 50 m),采用的激光器为法国 QUANTEL 公司研制的紧凑型米氏散射激光雷达,波长为 532 nm,垂直分辨率为 30 m。利用该雷达系统收集了 2014 年春季 3 月 1 日至 4 月 30 日的气溶胶雷达回波信号。实验过程中,每隔 15 min 垂直发射 2000 束激光脉冲,发射时长 100 s,将 2000 束雷达脉冲积累平均作为一组数据。

在该监测站点,同时获取了研究需要的相对湿度(RH_{fRH})、能见度、气温、风向、风速以及大气污染物 PM_{2.5}、PM₁₀ 质量浓度 m 等。此外,在观测站楼顶还安置了法国 CLMEL 公司生产的太阳光度计 CE318 用以获取气溶胶光学厚度,观测数据经过 ASTPwin 软件的处理后,选用经过严格滤云和最后验证的 level1.5 数据。

实验所选择的测量时间内,天空晴朗无云或对流层上部不存在肉眼可见的卷云。由于南京地区春季阴雨天气较多,本文收集到的激光雷达与观测站匹配的整点数据共 391 组,激光雷达、观测站以及太阳光度计三者均匹配的整点数据仅 113 组。

2.2 激光雷达数据反演气溶胶消光和光学厚度方法

米氏散射激光雷达方程为

$$P(z) = \frac{EC}{z^2} [\beta_1(z) + \beta_2(z)] \exp\left\{-2 \int_0^z [\sigma_1(z) + \sigma_2(z)] dz\right\}, \quad (1)$$

式中, $P(z)$ 为激光雷达获取的在高度 z 上返回的信号强度, E 为激光雷达输出的信号强度, C 为雷达系统校正常数, $\sigma_1(z)$ 和 $\beta_1(z)$ 以及 $\sigma_2(z)$ 和 $\beta_2(z)$ 分别表示在高度 z 上气溶胶以及大气分子的消光系数和后向散射系数。基于 Fernald 法,气溶胶后向散射系数 $\beta_1(z)$ 为^[18]

$$\beta_1(z) = -\beta_2(z) + \frac{P(z) \cdot z^2 \cdot \exp\left[-2(S_1 - S_2) \int_{z_c}^z \beta_2(z) dz\right]}{\frac{P(z_c) \cdot z_c^2}{\beta_1(z_c) + \beta_2(z_c)} - 2S_1 \int_{z_c}^z P(z) \cdot z^2 \cdot \exp\left[-2(S_1 - S_2) \int_{z_c}^z \beta_2(z) dz\right] dz}, \quad (2)$$

式中,空气分子的后向散射系数 $\beta_2(z)$ 可由当时的气压和温度垂直分布气象资料或使用标准大气模式通过瑞利散射理论计算得到^[19]。 S_1 即为LR; S_2 为空气分子消光后向散射比($8\pi/3$)。参考高度 z_c 取5 km,且 $\beta_1(z_c) + \beta_2(z_c) = 1.05\beta_2(z_c)$ ^[20]。由(2)式求得的气溶胶后向散射系数 $\beta_1(z)$ 乘以 S_1 就可得到气溶胶消光系数 $\sigma_1(z)$ [见(3)式],将气溶胶消光系数积分至5 km得到气溶胶光学厚度 τ [见(4)式]。对于积分高度的确定,主要基于两点考虑:1)气溶胶主要集中在对流层的中下层^[18],统计了实验所用的391组数据, $S_1=50$ sr时,将消光系数分别积分至5 km和10 km,发现5 km以下的光学厚度占到10 km光学厚度的96.9%;2)激光雷达探测有效距离限制,高度越往上信号噪声越大,反而影响到反演精度。

$$\sigma_1(z) = \beta_1(z) S_1, \quad (3)$$

$$\tau = \int_0^5 \sigma_1 dz. \quad (4)$$

2.3 LR 确定

由于采用非同轴发射的激光雷达,观测存在120 m盲区,因此假定120 m以下的气溶胶消光系数垂直方向上按指数分布,即

$$\sigma_1(z) = \sigma_1(0) \times \exp\left(-\frac{z}{H}\right), \quad (5)$$

式中 H 为标高,根据李成才等^[21]提出的标高拟合法,将能见度和气溶胶光学厚度进行拟合得到南京地区春季气溶胶的标高为1857.9 m。将120 m处的消光系数代入(5)式,即可解算出120 m以下各高度的消光系数。

LR的确定方法为贺千山^[12]提出的查算表法。如图1所示,令LR在1~100之间取不同的值,从而根据(1)~(5)式得到了各数据中不同LR值与雷达反演得到的气溶胶光学厚度的查算表。再将CE318实测的气溶胶光学厚度代入到所建立的LR与光学厚度的查算表中,可得到各数据对应的LR值。

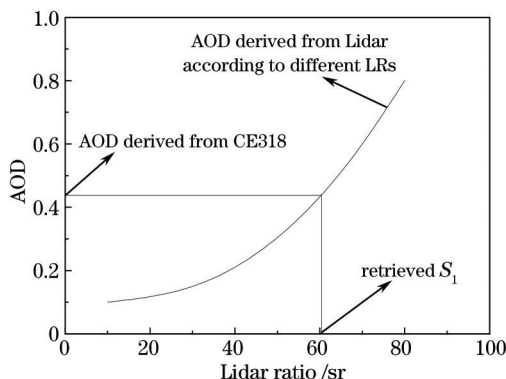


图1 查算表法图示

Fig.1 Sketch map of look-up table method

2.4 雷达比影响因子分析

利用查算表法计算得到观测期间的雷达比均值为78 sr,比常规情况下的固定值50 sr高,这可能与频繁出现的污染天气有关。利用逐步回归的方法将查算表法所得的LR与污染物数据以及气象数据进行统计学分析。仙林观测站提供的污染物数据包含 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 等。 O_3 是 NO_2 光化学作用的产物,同时 O_3 也能够形成 NO_2 ,所以为了消除共线性的影响只选择 NO_2 参与分析。类似的情况还有 PM_{10} ,由于 PM_{10} 包含 $PM_{2.5}$,所以只考虑 $PM_{2.5}$ 。气象数据主要使用相对湿度、温度、气压以及风速。经过分析, $PM_{2.5}$ 、相对湿度、 SO_2 和 NO_2 与LR的相关关系最好, $PM_{2.5}$ 、相对湿度与LR正相关, SO_2 和 NO_2 与LR负相关,相关性 R 分别为0.653、0.446、0.221、0.235,故可以将其作为影响因子参与LR估算模型的构建。表1为模型各要素的详细参

数,表中 Sig.为系统计算出的相应显著统计量出现的概率。从标准化系数可以发现,PM_{2.5}对于雷达比的贡献是最大的,相对湿度其次。选用的4个因子除相对湿度外,均通过了0.01的显著性检验。

表1 模型详细参数

Table1 Details of the regression model

	Unstandardized coefficient	Standardized coefficient	Sig.
Constant	19.023		0.008
$m(\text{PM}_{2.5}) / (\mu\text{g}/\text{m}^3)$	0.6174	0.609	0.000
RH /%	1.080	0.331	0.084
$m(\text{SO}_2) / (\mu\text{g}/\text{m}^3)$	-0.3107	-0.113	0.000
$m(\text{NO}_2) / (\mu\text{g}/\text{m}^3)$	-0.3587	-0.206	0.003

在影响消光系数的气溶胶粒子中,粒径小于2.5 μm的粒子(PM_{2.5})的消光作用远大于2.5 μm以上的粒子^[22]。前人研究表明,空气中PM_{2.5}质量浓度与消光系数具有明显的正相关关系^[23]。因此PM_{2.5}质量浓度与LR值存在很大的关联。

相对湿度对LR的影响主要是随着相对湿度的增加,吸湿性和溶解性气溶胶粒子的尺度将随之增大^[24]。在粒子与周围空气相互作用的过程中,气溶胶粒子将会与水蒸气混合,粒子的尺度及其分布、形状以及化学构成均将发生变化,从而其折射指数和粒子的消光截面等物理、光学属性也随之改变,并引起粒子辐射特性的变化。此外,空气中相对湿度上升到一定程度时形成的水蒸气或雾本身也会加大对光的吸收和散射,这些都会对LR造成影响。Salemink等^[25]通过实验分析发现在垂直方向上LR的变化与相对湿度具有很高的相关性。

SO₂和NO₂在污染大气中通过复杂的物理过程和光化学烟雾反应会生成硫酸盐、硝酸盐气溶胶粒子。这些气溶胶粒子会对整体气溶胶的光学特性产生很大影响。Sisler等^[26]通过对气溶胶成分及消光影响的研究提出,由于硫酸盐具有高吸湿性,高吸湿性的硫酸盐往往是能见度的最大影响因素。此外,Apple等^[27]的研究发现二次硝酸盐气溶胶对光的散射作用比硫酸盐粒子更强。

3 结果与验证

3.1 LR拟合模型精度分析

(6)式为根据表1得到的逐步回归方程:

$$S_1 = 19.023 + 0.6174(\text{PM}_{2.5}) + 1.08f_{\text{RH}} - 0.3107m(\text{SO}_2) - 0.3587m(\text{NO}_2), \quad (6)$$

式中 $m(\text{PM}_{2.5})$ 、 $m(\text{SO}_2)$ 、 $m(\text{NO}_2)$ 为PM_{2.5}、SO₂和NO₂的质量浓度,单位均为μg/m³。f_{RH}即相对湿度,单位为%。模拟结果与实测AOD约束结果的相关性R为0.736。

图2为根据(6)式绘制的113组查找表法计算的雷达比和模型拟合雷达比的对比图。从图中可以看出雷达比存在很明显的变化,观测期间LR最小值为26 sr,最大值为136 sr,固定的雷达比显然是不合适的。估算模型基本可以展现出雷达比的变化趋势,但是当雷达比出现较大或较小情况时,拟合效果不佳。

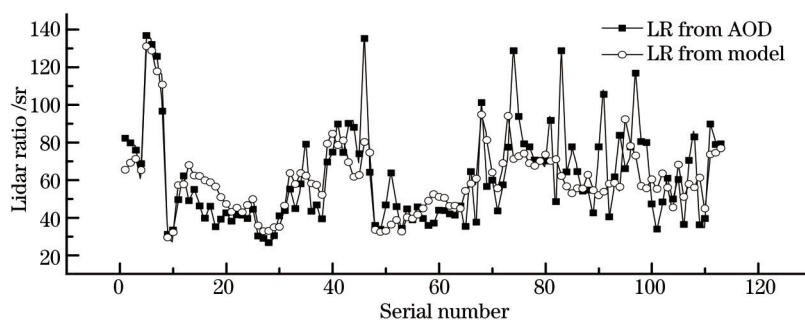


图2 模型拟合效果图

Fig.2 Fitting results of the estimation model

3.2 近地表消光系数反演精度分析

为验证雷达比估算模型的效果,将根据(6)式估算的LR值与LR取固定值时反演的近地表气溶胶消光系数与实测数据进行对比。其中LR固定值取50 sr。

近地表消光系数 $\sigma_{\text{ext}}(\lambda)$ 由观测站实测能见度换算可得^[28]

$$\sigma_{\text{ext}}(\lambda) = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q}, \quad (7)$$

式中V为能见度,单位为km。 λ 为波长,单位为 μm 。系数q根据不同的能见度取不同的值^[29],如(8)式所示。

$$q = \begin{cases} 0.585V^{1/3}, & V < 6 \text{ km} \\ 1.3, & 6 \text{ km} \leq V < 50 \text{ km} \\ 1.6, & V \geq 50 \text{ km} \end{cases} \quad (8)$$

图3(a)、(b)分别表示当 $S_1=50$ sr以及采用动态LR时,激光雷达反演得到近地表气溶胶消光系数与观测值的相关关系。由图可见,采用动态雷达比使近地表消光系数的反演值与实测值的相关性 R^2 由0.1099上升到0.6083。

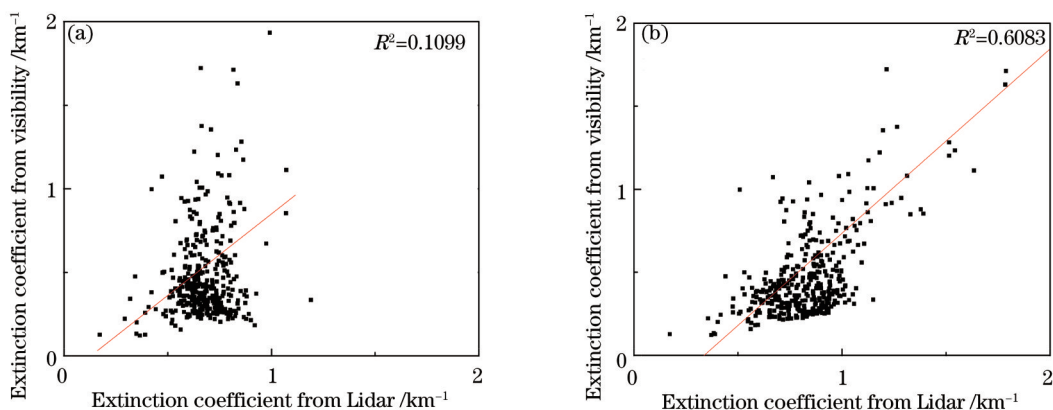


图3 激光雷达反演得到的近地表气溶胶消光系数与能见度确定的近地表气溶胶消光系数的相关关系。(a) $S_1=50$ sr;(b) 动态LR
Fig.3 Comparison between Lidar-derived near-surface aerosol extinction coefficient and its visibility-derived counterpart. (a) $S_1=50$ sr; (b) varied Lidar ratios

进一步对图3(a)中的数据进行分析,把 $S_1=50$ sr时的消光系数反演结果和实测能见度换算的消光系数计算相对误差,将相对误差分段进行统计,得到表2。由以上分析可知 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和相对湿度对LR的影响最为明显,从表2中亦可以看出,不同的误差段之间, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和相对湿度均值都存在明显差异。在污染严重且相对湿度比较大的情况下,LR的值明显偏大。反之,当空气中颗粒物浓度低且比较干燥时,LR的值则偏小。可见,固定值并不能反映雷达比的真实状况,其必然会给消光系数的估算带来不同程度的误差。

表2 相对误差分段统计表

Table 2 Statistical list by different relative error ranges

Relative error	Number of samples	$\text{PM}_{2.5}$ average / ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	RH average /%	$m(\text{SO}_2)$ average / ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$m(\text{NO}_2)$ average / ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	LR average /sr
≥ 0.2	43	130.8	58.7	39.8	65.3	113.6
0.2 to -0.2	70	99.2	48.2	38.1	61.2	92.4
-0.2 to -1	168	77.3	40.2	35.4	65.6	73.2
≤ -1	110	57.4	32.8	24	49.4	61.8

3.3 垂直方向消光系数反演精度分析

为分析激光雷达的垂直反演精度,随机选取了试验期内4个时间点的消光系数廓线进行分析(见图4)。由估算模型得到的4个时间点的雷达比分别为34、80、35、91 sr。由图4可见,动态雷达比对反演结果的影响主要作用在大气边界层以内,这主要是由于边界层往上气溶胶含量极低,对光的吸收和散射作用也很小,因此在此高度以上消光系数的反演受雷达比影响很小。由此可见,如果利用激光雷达进行大气边界层高度计

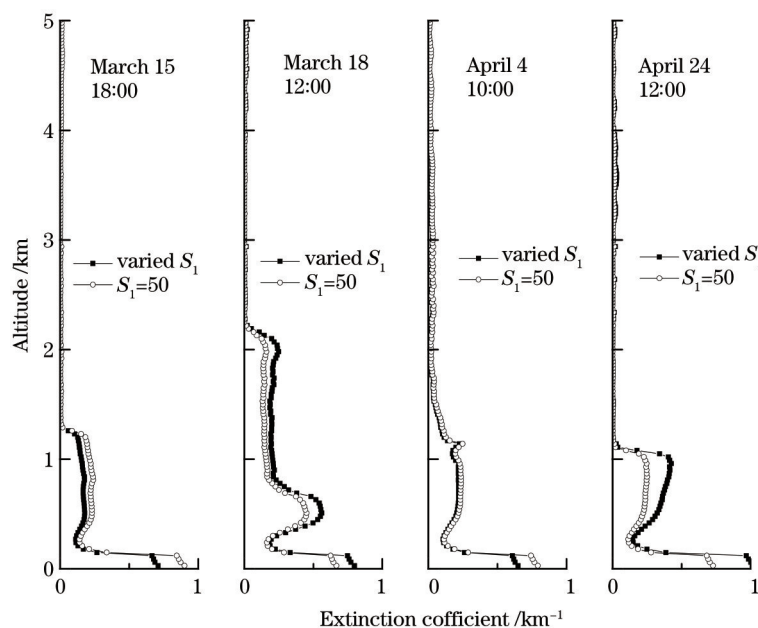


图 4 消光系数垂直廓线图

Fig.4 Vertical profiles of extinction coefficient

算,雷达比对计算结果的影响不大。

由于缺乏各高度的实测消光系数数据,因此选择通过将消光系数积分得到气溶胶光学厚度来评价雷达反演精度。图 5(a)、(b)分别表示当 $S_1=50$ sr 以及采用动态 LR 时,激光雷达所反演得到 AOD 与 CE318 观测值的相关关系。由于消光系数计算精度的提高,利用动态雷达比反演的 AOD 精度也有了明显提高,相关性 R^2 达到了 0.6969。表 3 为两种反演方法的误差分析结果,结果表明相比于固定的 LR,动态 LR 反演得到的 AOD 整体更接近地基实测的 AOD 值。

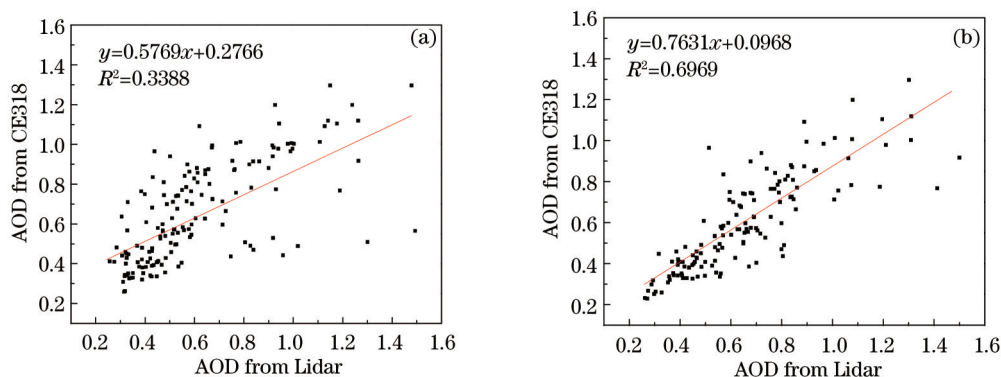


图 5 激光雷达所反演得到的气溶胶光学厚度与太阳光度计观测的气溶胶光学厚度的相关关系。(a) $S_1=50$ sr;(b)动态 LR
Fig.5 Relationship between Lidar-derived AOD obtained by laser inversion and measured by sun photometer. (a) $S_1=50$ sr; (b) varied

Lidar ratios

表 3 误差分析结果

Table 3 Results of error analysis

	Number of samples	Average of absolute error	Average of relative error	R^2
$S_1=50$ sr	113	0.13	0.21	0.3388
Varied LR	113	0.09	0.18	0.6969

4 结 论

基于南京地区 2014 年春季测量的激光雷达、气象数据、大气污染物数据以及 CE318 观测的 AOD 数据,

探讨了一种基于动态激光雷达比的气溶胶消光系数和光学厚度反演方法。研究结论如下：

1) 雷达比受到多重因素影响,即使在短时间内也存在明显变化。传统方法中利用固定雷达比参与反演并不合理;

2) 激光雷达比的变化与空气 $PM_{2.5}$ 质量浓度、相对湿度以及硫化物、氮氧化物具有明显的相关性,利用这些因子参与 LR 估算模型构建具有可行性;

3) 相比于固定的雷达比,利用模型得到的动态雷达比反演得到的气溶胶消光系数和光学厚度精度明显提高。光学厚度与实测数据的相关性由 0.3388 提高到 0.6969,消光系数与能见度换算结果的相关性由 0.1099 上升到 0.6083;

4) 动态雷达比对雷达反演结果的影响主要集中在气溶胶聚集的大气边界层以下。

此外,本文主要研究了不同时间的雷达比变化差异,以及动态雷达比对提高激光雷达反演气溶胶消光系数及光学厚度的精度的作用,并没有考虑到垂直高度上雷达比的变化。为进一步提高雷达反演精度,垂直空间的雷达比变化情况还需要进一步研究。

参 考 文 献

- 1 V Ramanathan, P J Crutzen, J T Kiehl, *et al.*. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 2001, 294(5549): 2119–2124.
- 2 M Sicard, F Roca-denbosch, M B M Reba, *et al.*. Seasonal variability of aerosol optical properties observed by means of a Raman lidar at an EARLINET site over northeastern Spain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(1): 175–190.
- 3 G Pappalardo, U Wandinger, L Mona, *et al.*. EARLINET correlative measurements for CALIPSO: First intercomparison results[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 2010, 115(D4): D00G19.
- 4 Zhou Jun, Yue Guming, Jin Chuanjia, *et al.*. Two-wavelength Mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(10): 1412–1417.
周 军, 岳古明, 金传佳, 等. 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*, 2000, 20(10): 1412–1417.
- 5 Li Jun, Gong Wei, Mao Feiyue, *et al.*. Dual field of view lidar for observing atmospheric aerosols over Wuhan [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1201001.
李 俊, 龚 威, 毛飞跃, 等. 探测武汉上空大气气溶胶的双视场激光雷达[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1201001.
- 6 R T H Collis, P B Russell. Lidar Measurement of Particles and Gases by Elastic Backscattering and Differential Absorption [M]. // *Laser Monitoring of the Atmosphere*, Springer Berlin Heidelberg, 1976. 71–151.
- 7 J D Klett. Stable analytical inversion solution for processing Lidar returns [J]. *Appl Opt*, 1981, 20(2): 211–220.
- 8 F G Fernald. Analysis of atmospheric Lidar observations: Some comments [J]. *Appl Opt*, 1984, 23(5): 652–653.
- 9 Liu Xingang. Research on Aerosol Hygroscopic Properties by Measurement and Model——Taking Beijing and PRD for Example [D]. Beijing: Peking University, 2008.
刘新罡. 大气气溶胶吸湿性质观测、模型研究——以北京、珠江三角洲地区为例[D]. 北京: 北京大学, 2008.
- 10 Wang Xiangchuan, Rao Ruizhong. Lidar ratio for atmospheric aerosol and cloud particles [J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 32(10): 1321–1324.
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*, 2006, 32(10): 1321–1324.
- 11 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.
- 12 He Qianshan. Remote Sensing of Tropospheric Aerosol Optical Properties and Distribution Characteristics by Micro Pulse Lidar [D]. Beijing: Peking University, 2006.
贺千山. 微脉冲激光雷达研究对流层气溶胶光学属性和分布特征[D]. 北京: 北京大学, 2006.
- 13 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.
- 14 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.
- 15 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 [J]. *Atmos Chem Phys*, 2003, 3(5): 1817–1831.

- 16 E J Welton, K H Voss, H R Gordon, *et al.*. Ground-based lidar measurements of aerosols during ACE-2: Instrument description, results, and comparisons with other ground-based and airborne measurements [J]. *Tellus B*, 2000, 52(2): 636-651.
- 17 Zhang Zhaoyang, Su Lin, Chen Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0513002.
张朝阳, 苏林, 陈良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0513002.
- 18 Q S He, C C Li, J T Mao, *et al.*. A study on the aerosol extinction-to-backscatter ratio with combination of micro-pulse LIDAR and MODIS over Hong Kong [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(11): 3243-3256.
- 19 Y Sasano, T Kobayashi. Feasibility study on space lidars for measuring global atmospheric environment [R]. NIES, 1995, 4: 33-34.
- 20 C W Chiang, S K Das, J B Nee. An iterative calculation to derive extinction-to-backscatter ratio based on Lidar measurements [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2008, 109(7): 1187-1195.
- 21 Li Chengcai, Mao Jietai, Alexis Kai-Hon Lau, *et al.*. Research on the air Pollution in Beijing and Its Surroundings with MODIS AOD Products [J]. *Chinese J Atmospheric Sciences*, 2003, 27(5): 869-880.
李成才, 毛节奏, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染[J]. *大气科学*, 2003, 27(5): 869-880.
- 22 Yang Xinxing, Feng Lihua, Wei Peng. Air particulate matter PM_{2.5} in Beijing and its harm [J]. *Frontier Science*, 2012, 21(6):25-30.
杨新兴, 冯丽华, 尉鹏. 大气颗粒物 PM_{2.5} 及其危害[J]. *前沿科学*, 2012, 21(6): 25-30.
- 23 He Tao, Hou Lujian, Lü Bo, *et al.*. Study of accuracy of Lidar inversion PM_{2.5} concentration [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0113001.
何涛, 侯鲁健, 吕波, 等. 激光雷达探测反演 PM_{2.5} 浓度的精度研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0113001.
- 24 Zhang Lisheng, Shi Guangyu. The impact of relative humidity on radiative property and radiative forcing of sulfate aerosol [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(2): 230-237.
张立盛, 石广玉. 相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响[J]. *气象学报*, 2002, 60(2): 230-237.
- 25 H W M Saleemink, P Schotanus, J B Bergwerff. Quantitative Lidar at 532 nm for vertical extinction profiles and the effect of relative humidity [J]. *Appl Phys B*, 1984, 34(4): 187-189.
- 26 J F Sisler, W C Malm. The relative importance of soluble aerosols to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, 28(5): 851-862.
- 27 B R Appel, Y Tokiwa, J Hsu, *et al.*. Visibility as related to atmospheric aerosol constituents [J]. *Atmospheric Environment*, 1985, 19(9): 1525-1534.
- 28 H Koschmieder. *Theorie Der Horizontalen Sichtweite: Kontrast und Sichtweite* [M]. Keim & Nemnich, 1925.
- 29 W E K Middleton. *Vision through the Atmosphere* [M]//*Geophysik II*, Springer Berlin Heidelberg, 1952.

栏目编辑: 王晓琰